فسيولوجيا المحاصيل

CROP PHYSIOLOGY



دكتور

عبد الحميد محمد حساين

أستاذ إنتاج وفسيولوجيا المحاصيل

كلية الزراعة - جامعة الأزهر

فسيولوجيا المحاصيل

CROP PHYSIOLOGY

دكتور

عبدالحميد محمد حسانين

أستاذ إنتاج وفسيولوجيا المحاصيل

كلية الزراعة – جامعة الأزهر

فسيولوجيا المحاصيل

CROP PHYSIOLOGY

الطبعة الثانية

(١٤٤١هـ - ٢٠٢٠م)

إهداء

إلى كل الذين يعملون مخلصين

من أجل

حماية الإنسان من

الجوع

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

"واتقوا الله ويعلمكم الله"

صدق الله العظيم

محتويات الكتاب

صفحة

بسم الله الرحمن الرحيم

"الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله"

والحمد لله الذي أحاط بكل شئ علما، والصلاة والسلام على رسوله الكريم الذي أنار لنا طريق الهداية. وبعد،

أقدم هذا الكتاب، في فسيولوجيا المحاصيل "Crop Physiology"، لطلابنا الأعزاء في كليات الزراعة، في كل من مرحلة البكالوريوس، وطلاب الدراسات العليا، وكل المهتمين، والباحثين، والعاملين بالزراعة بوجه عام، وفسيولوجيا المحاصيل بوجه خاص، إيمانا مني بحاجة المكتبة العربية إلى مرجع متخصص في هذا المجال.

لقد اشتمل هذا الكتاب على أحد عشر بابا، تضم مقدمة عن مجال وأهمية علم فسيولوجيا المحاصيل، ونبذة تاريخية عنه. ولقد تم تخصيص فصلين منفصلين لعملية التمثيل الضوئي، وكفاءة اعتراض الكساء الخضري لنباتات محاصيل الحقل، لما لهما من أهمية كبيرة في تحديد كمية محصول المحاصيل المنزرعة. كما يتضمن الكتاب النمو الخضري لنباتات محاصيل الحقل والعوامل البيئية المؤثرة عليه. كما تضمن الكتاب إزهار وإثمار نباتات محاصيل الحقل والعوامل المؤثرة عليه. ولقد تناول الكتاب شرحا لإنبات بذور نباتات محاصيل الحقل والعوامل المؤثرة عليه.

ولقد تضمن الكتاب أيضا شرحا لكل من العلاقات المائية لنباتات محاصيل الحقل، فيما يختص بالاجهاد المائي، ويسر الماء بالتربة وامتصاصه، والنتح والتبخير، وكفاءة استخدام الماء بواسطة نباتات محاصيل الحقل.

كما اشتمل الكتاب على التغذية المعدنية لنباتات محاصيل الحقل، من حيث العناصر الغذائية الضرورية، ومصادرها ويسرها للنبات، وآليات امتصاصها بواسطة النبات ووظيفتها بالنبات.

ولقد روعي في هذا الكتاب الدقة العلمية، وسهولة العرض، كما زود الكتاب بكثير من الرسوم والأشكال التوضيحية، ولقد اعتمد المؤلف فيما اورد في هذا الكتاب من بيانات، ونتائج التجارب المختلفة، على ما نشر في المراجع

والدوريات العلمية المتخصصة، وكذلك على المعلومات والخبرات العلمية التي توافرت لدى المؤلف في هذا المجال، ولقد أشير إلى جميع هذه المصادر في متن الكتاب، كما ذكرت تفصيلا في نهايته.

وهنا تجدر الإشارة إلى أنه قد روعي التركيز لحد ما على النواحي التطبيقية لفسيولوجيا المحاصيل، والإستفادة منها في النواحي الإنتاجية عن طريق حل مشاكل منتجي المحاصيل الحقلية.

والحمد لله الذي أعانني على إصدار هذا الكتاب، وأدعوا الله سبحانه وتعالى أن ينفع به، وأن يجعل مابذل فيه من جهد خالصا لوجهه الكريم، إنه نعم المولى ونعم المصير.

ويسرني أن أتقدم بخالص الشكر والتقدير لإبننا العزيز/ السيد فاروق محمد المدرس المساعد بالقسم على مابذله من جهد كبير في طباعة ونشر هذا الكتاب.

القاهرة في: يناير ٢٠٢٠م

المؤلف

أ.د/ عبدالحميد محمد حسانين

الباب الأول

نبذة تاريخية عن
علم فسيولوجيا المحاصيل

إن الزيادة المضطردة في عدد السكان تتطلب زيادة الإنتاج من المحاصيل المنزرعة، ليتناسب مع زيادة السكان في كثير من دول العالم. ويمكن زيادة الإنتاج من المحاصيل المنزرعة، عن طريق زيادة المساحة المنزرعة، أو زيادة غلة الفدان، أو عن طريقهما معا، ولما كانت زيادة غلة الفدان، تتطلب فهم سلوك نباتات محاصيل الحقل المختلفة تحت الظروف البيئية المتغيرة في الحقل، وتأثير هذه الظروف البيئية على كمية المحصول، كما تتطلب تعديل الظروف البيئية النامي فيها المحصول، بما يتناسب والحصول على المحصول الأعظم، ولذلك فقد نشأ علم فسيولوجيا المحاصيل لتحقيق هذه الأغراض.

إن علم فسيولوجيا المحاصيل Crop physiology يهتم بدراسة نمو وتكشف نباتات المحاصيل، خلال دورة حياتها، وتأثرها بالعوامل البيئية المحيطة، تحت الظروف البيئية الطبيعية لنموها في الحقل في مجموعات (عشائر) نباتية، وليس نباتات فردية، كما يهتم أيضا بتتبع سلوك المحصول أثناء دورة حياته، وتحديد الأطوار الحرجة أثناء حياته للعوامل البيئية المؤثرة على المحصول كمية وجودة، والعمل على تعديل هذه الظروف، بما يتناسب والحصول على المحصول الأعظم.

لقد بدأ الإنسان منذ زمن بعيد بزراعة المحاصيل، وبدأ بدراستها من زوايا مختلفة، ولقد نشرت نتائج بعض هذه الدراسات في مجلات علمية مختلفة، ثم بدأ بتفسير هذه النتائج والمعلومات المتجمعة، ولقد تجمعت معلومات كثيرة، ولكنها لم تكن كافية في ذلك الوقت لتكوين علم قائم بذاته. وأن نشوء علم فسيولوجيا المحاصيل وتطوره راجع وبلا شك لفضل كثير من الباحثين

والعلماء الأوائل، وهنا نود أن نسرد حصرا مختصرا لأسماء أهم العلماء ومساهماتهم في نشوء وتطور هذا العلم.

منذ أكثر من ٢٤٠ عام، وبالتحديد في عام ١٧٧١م، اكتشف العالم Josef Priestley أن النباتات يمكنها أن تجدد الأكسجين، في جو غني بغاز ثاني أكسيد الكربون، إذ تمكن من التعرف على أن النبات في بعض الأحيان يمكن أن يحرر أكسجين إلى الجو المحيط به، ولقد أدى هذا الإكتشاف إلى كشف الكثير من الغموض الذي يتعلق بحياة النبات.

وبعد ثماني سنوات من هذا التاريخ، أظهر العالم Ingenhousz أن الضوء يلعب الدور الرئيسي في عملية تحرر الأكسجين من النبات، ثم بدأ بدراسة عملية التمثيل الضوئي، كعملية رئيسة بالنسبة لفسيولوجيا المحاصيل.

وفي عام ١٨٠٤م، أثبت العالم De Saussure حاجة النبات إلى امتصاص العناصر المعدنية والنترات من التربة، كما أثبت أن النبات يمتص الأكسجين ويحرر غاز ثاني أكسيد الكربون، وهذه العملية أساس التنفس، كما أثبت أيضا أن النبات يمتص غاز ثاني أكسيد الكربون ويطلق غاز الأكسجين في وجود الضوء، كما وضح أيضا أن النبات يموت، إذا وضع في جو خال من غاز ثاني أكسيد الكربون.

ولقد أظهرت التجارب التي أجراها الباحث الزراعي الفرنسي Boussinghault والذي يعتبر مؤسس التجارب الحقلية، إذ يعتبر أول من قام بإجراء تجارب عملية تحت ظروف الحقل. ولقد أثبت من تجاربه، أنه بينما تحصل نباتات القمح على النيتروجين فقط من التربة، فإن نباتات البرسيم يمكن أن تحصل أيضا على كميات كبيرة من النيتروجين من الهواء الجوي. ولقد وجد بعد ذلك عددا من العلماء، أن بعض المحاصيل البقولية تنمو جيدا في الأراضي التي لا يضاف لها النيتروجين، على عكس المحاصيل الغير بقولية، التي يلزم لها النيتروجين لكي تنمو جيدا.

وفي الفترة من ١٨٠٣ – ١٨٧٣م، أجرى العالم الألماني ليبيج Justus von Liebig العديد من التجارب، وكانت أهم النتائج التي توصل إليهاهي، أن معظم الكربون في النبات يأتي عن طريق غاز ثاني أكسيد الكربون الجوي، وأن مصدر الأكسجين والهيدروجين هو الماء، وأن الفوسفور والبوتاسيوم ضروريا لنمو النبات. ولقد قام ليبيج بدرسة العلاقات الكمية بين النبات، وعوامل النمو ووضع قانون باسمه، وهو قانون الحد الأدنى Low of minimum وينص هذا القانون على أن العامل المحدد لنمو النبات هو العنصر

الغذائي الموجود في التربة بكميات قليلة، والعناصر الغذائية الأخرى تكون موجودة بكميات كافية لإحتياج النبات.

وفي عام ١٨٤٣م، تأسست أول محطة تجارب زراعية في روثاميستد Rothamsted في إنجلترا، ومن أهم العلماء اللذين قاموا بإجراء تجارب حقلية في هذه المحطة هما العالمان Gilbert و Lawes ومن أهم النتائج التي توصلا إليها، هي أن المحاصيل الحقلية غير البقولية، تحتاج إلى النيتروجين، وبدونه لا تستطيع النباتات النمو بغض النظر عن توافر العناصر المعدنية الأخرى، وأن المحاصيل الحقلية تحتاج إلى الفوسفور والبوتاسيوم لنموها، وأن خصوبة التربة يمكن المحافظة عليها لعدد من السنين، وذلك عن طريق إضافة الأسمدة الكيماوية، وأن عملية التبوير Fallow (ترك الأرض بدون زراعة فترة معينة) تعمل على زيادة إنتاجية النيتروجين الميسر بالأرض.

ولقد أنشئت أول محطة تجارب زراعية في الولايات المتحدة في عام ١٨٧٥م، في Middletwen في ولاية Connecticut ثم تبع ذلك إنشاء محطات أخرى في ولايات أخرى، ولقد كانت هذه المحطات في بادئ الأمر محطات للإرشاد الزراعي، ثم تطورت إلى أن أصبحت محطات لإجراء الأبحاث العلمية بغرض حل المشاكل الزراعية.

لقد ظل الغموض يكتنف عملية تثبيت الأزوت الجوي بواسطة بكتيريا العقد الجذرية، إلى أن اكتشفا العالمان الألمانيان Hellriegel و Wilfarth في عام ١٨٨٦م، طبيعة عملية تثبيت الأزوت الجوي بواسطة بكتيريا العقد الجذرية التي تعيش على جذور النباتات البقولية، والتي أعتبرت أحد الإختلافات الرئيسية بين أنواع المحاصيل المختلفة، ولكنهما لم يستطيعا حينها عزل بكتيريا العقد الجذرية في البقوليات.

وفي نهاية النصف الأول من القرن التاسع عشر، سادت دراسة فسيولوجيا مبيدات الجشائش، ولقد تركزت في البداية على مبيدات الحشائش التابعة لمجموعة الأكسينات، ثم تناولت هذه الدراسة منظمات النمو على نطاق واسع.

ولقد بدأت دراسة سلوك نباتات المحصول النامية تحت ظروف الحقل بواسطة العالم بولز Balls على محصول القطن في مصر، وفي عام ١٩١٥م قام كلا من بولز وهولتون Holton بتحليل تأثيرات المسافة بين النباتات، وميعاد الزراعة، على نمو ومحصول نباتات القطن تحت ظروف نموها في الحقل، في مجموعات نباتية وليس كنباتات فردية.

ولقد قام بولز أيضا بتحليل تأثيرات بعض العوامل البيئية على محصول القطن، واستنتج أن هناك ظواهر لا يمكن تفسيرها إلا عن طريق البحث عن المراحل (الفترات) الحرجة أثناء دورة حياة النبات، والحساسة للظروف القاسية، والمحددة لكمية المحصول. وعلى سبيل المثال، وجد بولز أنه أثناء شهر يوليو، أن إزهار نباتات القطن لا تتأثر كثيرا بالري، ولكن الري يعتبر العامل الرئيسي المحدد لطول شعرة القطن خلال نفس الفترة، ونتيجة لذلك فقد استنتج فكرة العامل المحدد Limiting factor. من ذلك اتضح أن أي عامل بيئي معين قد يؤثر على النبات بطرق مختلفة وعلى أعضاء أو أنسجة أو مكونات مختلفة بالنبات بدرجات مختلفة، وفي أطوار نمو مختلفة أثناء حياة النبات.

ولقد ذكر بولز بأنه عن طريق فسيولوجيا المحاصيل، يمكن تفسير نجاح أو فشل عملية زراعية معينة، عن طريق دراسة سلوك المحصول أثناء دورة حياته في الحقل. ولكن طرق دراسة سلوك المحصول، خلال دورة حياته تحت ظروف الحقل، للحكم على نجاح أو فشل عملية زراعية معينة، ظلت غير معروفة إلى ما بعد أبحاث بولز هذه بحوالي عشر سنوات، حيث أنه في العشر سنوات التالية لأبحاث بولز، حدث تقدما سريعا في الوصول إلى طرق تحليل النمو والمحصول، وذلك بواسطة نخبة من الباحثين البارزين.

وفي عام ١٩٠٥م، أثبت العالم بلاكمان Blackman، أهمية قانون العامل المحدد، كوسيلة (طريقة) لتحليل العلاقات المعقدة بين المحصول والعوامل البيئية النامي فيها المحصول، وأن تتبع سلوك النبات أثناء دورة حياته يؤدي إلى تحديد الأطوار الحرجة في نموه، وذلك بالنسبة لعامل بيئي أو أوأكثر، وتحديد العوامل المتحكمة في كل طور من أطوار نمو المحصول.

وفي عام ١٩١٧م، اقترح العالم جريجوري Gregory أن الزيادة في المادة الجافة لكل وحدة مساحة من السطح الورقي يمكن أن تستخدم كمقياس للكفاءة التمثيلية للأوراق، والذي أطلق عليه صافي معدل التمثيل الضوئي Net assimilation rate . وفي عام ١٩٢٠م، أطلق بريجز Briggs وآخرون على صافي معدل التمثيل الضوئي إصطلاح Unit leaf rate .

وفي عام ١٩١٩م، وضع بلاكمان حجر الزاوية لتحليل نمو المحصول، إذ أثبت أن وزن النبات يمكن أن يزداد زيادة لوغاريتمية، وأن هذه الزيادة يمكن وصفها بما أسماه معدل النمو النسبي Relative growth rate.

ولقد عقد أول مؤتمر علمي، نوقشت فيه بعض أبحاث فسيولوجيا المحاصيل، وذلك في انجلترا، عام ١٩٢٤، ومن أهم العلماء البارزين الذين شاركوا فيه هم: بولز Balls وبلاكمان Blackman وبريجز Briggs وجريجوريGragory .

ولقد نال صافي معدل التمثيل الضوئي Net assimilation rate إهتماما كبيرا من قبل العديد من علماء فسيولوجيا المحاصيل، كعامل أساسي محدد للمحصول.

وفي عام ١٩٣٢م، أدرك Boysen-Jensen أن معدل التمثيل الضوئي لأوراق النباتات النامية معا في عشائر (مجاميع) نباتية في الحقل، كان أقل عنه في أوراق النباتات الفردية، وذلك بسبب تظليل الأوراق بعضها لبعض عند نمو النباتات في مجموعات نباتية، وهذا قاده إلى التوصل إلى أن مساحة السطح الورقي على النبات لا تكفي للحكم على كفاءة الأوراق في التمثيل الضوئي، بل لابد من الأخذ في الإعتبار النسبة بين المساحة الكلية للمجموع الخضري، وبين مساحة الأرض التي يشغلها هذا المجموع الخضري للنبات.

وفي عام ١٩٤٧م، قام العالم واتسون Watson، بوضع العلاقة بين مساحة الأوراق على النباتات، ومساحة الأرض التي يشغلها النبات بما أسماه "دليل مساحة الأوراق Leaf area index"، ولقد اعتبر دليل مساحة الأوراق مقياسا ذو أهمية كبيرة في تحليل نمو المحصول، كما أدى إلى زيادة الإهتمام بفسيولوجيا المحاصيل.

وفي عام ١٩٥٣م، قام العالمان مونسي Monsi وساكي Saeki في اليابان بإيجاد العلاقة بين دليل مساحة الأوراق وانقراض الأشعة الضوئية النافذة خلال الكساء الخضري للمحصول، بطريقة مماثلة لقانون بير Beer's law ولقد وجد من دراستهما، أن هناك إختلافا كبيرا بين العشائر النباتية في معامل انقراض مجموعها الخضري للضوء النافذ خلالها.

لقد كانت لأبحاث مونسي وساكي، أثرا كبيرا في تقدم علم فسيولوجيا المحاصيل، إذ أدت إلى إمكان وضع تعريف شامل ذو دلالة فسيولوجية للنمط المثالي لنباتات المحاصيل، للوصول إلى أعلى إنتاجية من المحاصيل المنزرعة. ولقد فتحت هذه الدراسات الطريق أمام مربوا الأرز في اليابان، لإنتاج أصناف جديدة من الأرز ذات شكل مثالي Ideal plant type عالية المحصول. ولقد تم تحديد بعض الصفات الموفولوجية والفسيولوجية المرتبطة بالإنتاجية العالية في محصول كثير من محاصيل الحقل، ولقد تم إنتاج أصناف

من الأرز قصيرة الساق ذات أوراق قائمة سميكة، وذات أفرع متجمعة، ونورات متدلية أسفل الأوراق العليا من النبات.

وفي عام ١٩٦٣م، وجدا هسكث Hesketh وموس Moss أن التمثيل الضوئي بواسطة أوراق نباتات الذرة الشامية، وقصب السكر، وبعض الأعشاب النجيلية الإستوائية، تسطيع أن تصل إلى معدلات عالية من التمثيل الضوئي بدرجة تشبع ضوئي أقل، بالمقارنة بالأنواع النباتية الأخرى. ثم جاء العالمان هاتش Hatch وسلاك Slack عام ١٩٦٦م وأثبتا بالدليل القاطع أنه يوجد مسار آخر لتثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون، غير مسار كالفن، وذلك في بعض الأنواع النباتية التي نشأت في المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية، وأطلق على النباتات التي تسلك هذا المسار بـ" النباتات رباعية الكربون". ثم قاما هاتش وسلاك بدراسة الفرق بين النباتات ثلاثية الكربون والنباتات رباعية الكربون، ولقد كان لهذه الدراسات أثرا كبيرا في تقدم علم فسيولوجيا المحاصيل، كما سوف يأتي توضيحة في أبواب هذا الكتاب.

وعموما، يمكن القول بأن علم فسيولوجيا المحاصيل قد نال إهتمام العديد من العلماء في السنوات الأخيرة. ولقد تم نشر أول كتاب في فسيولوجيا المحاصيل عام ١٩٧٤م بواسطة ملثورب Milthope وموربي Moorby ، بعنوان "مقدمة في فسيولوجيا المحاصيل An Introduction to Crop Physiology".

وفي عام ١٩٧٧ في مصر قام الدكتور مصطفى علي مرسي أستاذ المحاصيل بإجراء العديد من الأبحاث في مجال فسيولوجيا المحاصيل.

الباب الثاني

التمثيل الضوئي في نباتات محاصيل الحقل

تعتبر الزراعة نظاما تستغل فيه الطاقة الشمسية بواسطة النباتات عن طريق التمثيل الضوئي في تكوين مركبات عضوية مختلفة، ولقد أظهرت دراسات فسيولوجيا المحاصيل، أن محصول نباتات محاصيل الحقل المختلفة يعتمد على حجم وكفاءة جهاز التمثيل الضوئي، وأن عمليات خدمة المحصول مثل الري والتسميد وغيرها، تجرى من أجل الوصول إلى أعلى حجم وكفاءة لجهاز التمثيل الضوئي، وأعلى كمية محصول من المحصول المنزرع، إذ من المعروف أنه للوصول إلى أعلى نمو وكمية محصول من المحصول المنزرع فإنه يجب الوصول إلى إلى أقصى كمية من المادة الجافة المتكونة بوحدة المساحة. وأن المركبات الكربونية تمثل ٨٠-٩٠% من كمية المادة الجافة الكلية المنتجة بواسطة النباتات، وأن عملية التمثيل الضوئي تعتبر العملية الأساسية لبناء هذه المركبات، كما تعتبر حجر الزاوية في إنتاج المحصول. وسوف نوضح باختصار عملية التمثيل الضوئي، من حيث، خواص الضوء المستغل في عملية التمثيل الضوئي، جهاز التمثيل الضوئي، تفاعلات الضوء والظلام، العوامل المؤثرة على عملية التمثيل الضوئي.

خواص الضوء المستغل في عملية التمثيل الضوئي

يعتبر الضوء المرئي هو مصدر الطاقة الضوئية لعملية التمثيل الضوئي في نباتات المحاصيل، والذي يعتبر جزءا من الطاقة الشمسية، (شكل (٢-١).

إن الطاقة الضوئية ذات صفات مميزة وفريدة، ويمكن توضيحها بواسطة نظريتين هما: نظرية الموجات الكهرومغناطيسية Electro-magnetic wave length، ونظرية الكوانتم Quantum theory، إن نظرية الموجات الكهرومغناطيسية تنص على أن الضوء ينتقل على هيئة موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال مختلفة قصيرة، وأن عدد الموجات المارة على نقطة معينة في زمن معين تعبر عن التذبذب أو التردد Frequency، وأن العلاقة بين التردد وسرعة الضوء وطول الموجه يمكن توضيحها منالمعادلة الآتية:

$$V = C / ƛ$$

حيث أن:

V= التردد (أطوال الموجات / الثانية)

C= سرعة الضوء (٣ × ١٠ ^١٠^ سم / ثانية)

ƛ= طول الموجه

وإذا قسمنا سرعة الضوء على التردد فإننا نحصل على طول الموجه.

ونظرية الكوانتم تفترض أن الضوء ينتقل في صورة تيار من جزيئات صغيرة جدا يطلق عليها فوتونات Photones وحيث أن الطاقة الموجودة في كل فوتون تسمى كوانتم. فإن الكوانتم يعبر عنه بطول الموجه (شكل ٢-١)، أي كلما قصر طول الموجه الضوئية كلما زادت طاقة الكوانتم، ويمكن توضيح العلاقة بين طول الموجه والطاقة المتحصل عليها من المعادلة الآتية:

$$E=h \times V = C / ƛ$$

حيث أن :

E= طاقة الفوتون (الكوانتم)

h= ثابت بلانك (٦٦٢ × ١٠ ^٧^ أرج/ ثانية)

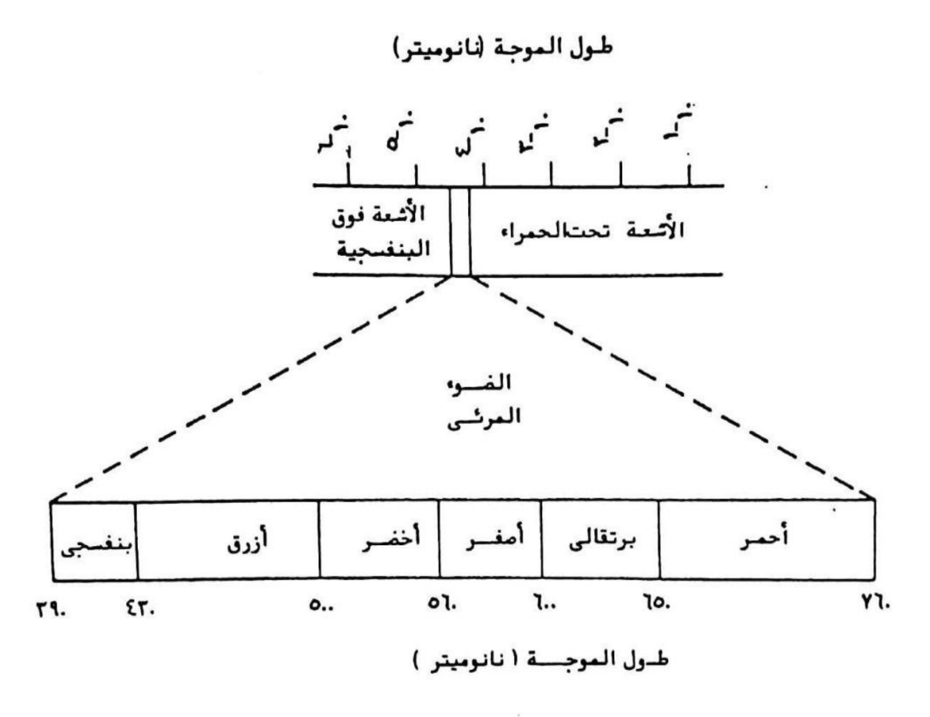
C= سرعة الضوء (٣ × ١٠ ^١٠^ سم/ ثانية)

ƛ= طول الموجه

إن تفاعل الضوء في عملية التمثيل الضوئي يعتبر نتيجة مباشرة لامتصاص الفوتون بواسطة جزيئات الكلورفيل. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه ليست كل الفوتونات ذات مستوى طاقة قادرة على إثارة الكلورفيل. إذ أن فوتونات الضوء ذو طول موجه أطول من ٧٦ نانومتر (nm) لا تحتوي على طاقة كافية لإثارة جزيئ الكلورفيل، وعلى العكس من ذلك فإن فوتونات الضوء ذو طول موجه أقل من ٣٩٠ نانومتر تحتوي على طاقة كبيرة جدا، فإذا امتصت بواسطة الكلوروفيل والصبغات الأخرى بالورقة فإنها تسبب تأينها وهدمها، أما فوتونات الضوء ذو طول موجه تتراوح بين ٣٩٠-٧٦٠ نانومتر (الضوء المرئي) ذات مستوى طاقة مناسب لعملية التمثيل الضوئي. ويبين شكل (٢-١) طيف الطاقة الإشعاعية.

إن الطاقة الضوئية اللازمة لعملية التمثيل الضوئي تستمد من الشمس والتي تعتبر مصدر الطاقة الدائم في غلافنا الجوي. وتشكل طاقة الضوء المرئي حوالي ٥٠% من الطاقة الشمسية، وتستخدم النباتات حوالي ٦٠% من هذه الكمية (حوالي ٣٠% من الكمية الأصلية) في عملية التمثيل الضوئي،

وتستخدم النباتات في عملية التمثيل الضوئي حوالي ١-٢% فقط من الطاقة الشمسية الكلية الساقطة على سطح الأرض.



شكل (٢-١). طيف الطاقة الإشعاعية والطول الموجي. الفوتونات في المجال من ٤٠٠-٧٠٠ ملليميكرون (نانومتر) هي المستغلة في عملية التمثيل الضوئي.

جهاز التمثيل الضوئي Photosynthetic apparatus

إن الخلية تعتبر وحدة البناء الأساسية لجسم النبات، وتعتبر البلاستيدات الخضراء Chloroplasts من المكونات الهامة لخلايا النباتات الخضراء. وتعتبر البلاستيدات الخضراء (الكلوروبلاستيدات) جهاز التمثيل الضوئي ف النباتات، وتحتوي على أنواع مختلفة من الصبغات أهمها:

أ- **الكلوروفيلات**: تعتبر أكثر الصبغات أهمية في النبات وتوجد في جميع الخلايا الممثلة للضوء، وأهم الكلوروفيلات التي توجد في النباتات الراقية هي كلوروفيل أ، وكلوروفيل ب. ويتميز كلوروفيل أ باللون الأخضرالمزرق، وتصل قمة منحنى إمتصاصه للضوء عند ٤٣٠ و ٦٦٠ ملليميكرون، ويوجد في جميع النباتات الممثلة للضوء، أما كلوروفيل ب فيتميز باللون الأصفر

المخضر، ويوجد في النباتات الراقية، والطحالب الخضراء وقمة منحنى إمتصاصه للضوء يكون عند ٤٦٥ و ٦٦٠ ملليميكرون.

ب- **الكاروتينيدات** Carotenoids: هي عبارة عن مجموعة من الصبغات تعطي اللون البرتقالي ولأصفر أو البني وأن أشد إمتصاص للضوء يكون عند الطيف الأزرق والأخضر المزرق. وتقسم الكاروتينيدات إلى مجموعتين هما ١- الكاروتينات Carotenes، ٢- الزانثوفيل Xanthophyll.

وتعتبر الكاروتينيدات صبغات مساعدة، وتلعب دورا هما في العمل مع الكلوروفيلات على امتصاص الطاقة الضوئية من الأشعة الشمسية وتحويلها إلى طاقة كيماوية، كما أنها تعمل كمرشح للضوء، مما يعمل على حماية الكلوروفيل من حدوث هدم وانحلال جزيئاته تحت مستويات الإضاءة الشديدة

وتحتوي الكلوروبلاستيدات أيضا على مكونات أخرى غير نشطة ضوئيا، ولكن لها أهمية خاصة في عملية البناء الضوئي، وليست بالضرورة أن تكون مشنركة في عملية التخليق، ومن هذه المواد: السيتوكرومات Cytochromes والفريدوكسينات Ferredoxines.

التركيب الداخلي للكلوروبلاستيدة

بفحص الكلوروبلاستيدة بواسطة الميكروسكوب الإلكتروني وجد أنها عبارة عن عضيات عدسية الشكل يتراوح قطرها بين ١-١٠ ملليميكرون. وكما هو موضح بشكل (٢-٢) تتركب الكلوروبلاستيدة من:

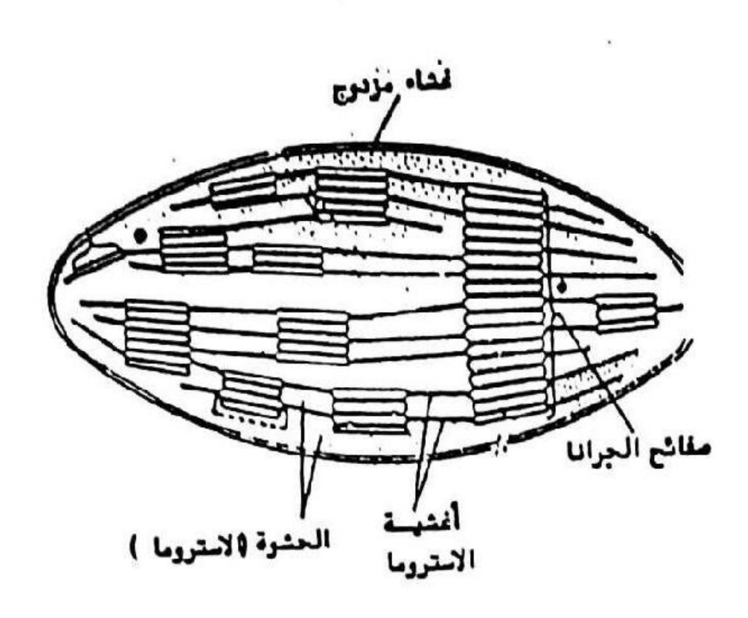
١- غشاء مزدوج: يحيط بمحتويات الكلوروبلاستيدة إحاطة تامة ويفصل مكونات الكلوروبلاستيدة عن السيتوبلازم، وهذه الأغشية اختيارية التفاذية.

٢- الحشوة (مادة الأساس) Stroma: وهي عبارة عن مادة الأساس البروتوبلازمية الشفافة الخالية من اللون الأخضر وهذه يحدث بها تفاعل الظلام Dark reaction.

٣- أغشية الستروما Stroma lamella: وهي عبارة عن طبقات من الأغشية المزدوجة Double lamella المتوازية تمتد على طول الكلوروبلاستيدة، وتصل البذيرات بعضها ببعض، وهي التي تعطي الكلوروبلاستيدة الشكل المخطط، وتحتوي على صبغات التمثيل الضوئي.

٤- **صفائح (أغشية) الجرانا (البذيرات) Garana lamella:** وهذه عبارة عن طبقات متراصة سميكة، تكون أشكالا قرصية داكنة اللون، ويطلق على كل منها "بذيرة Granum". وتظهر كل بذيرة كأنها أكياس مفلطحة متلاصقة وذات

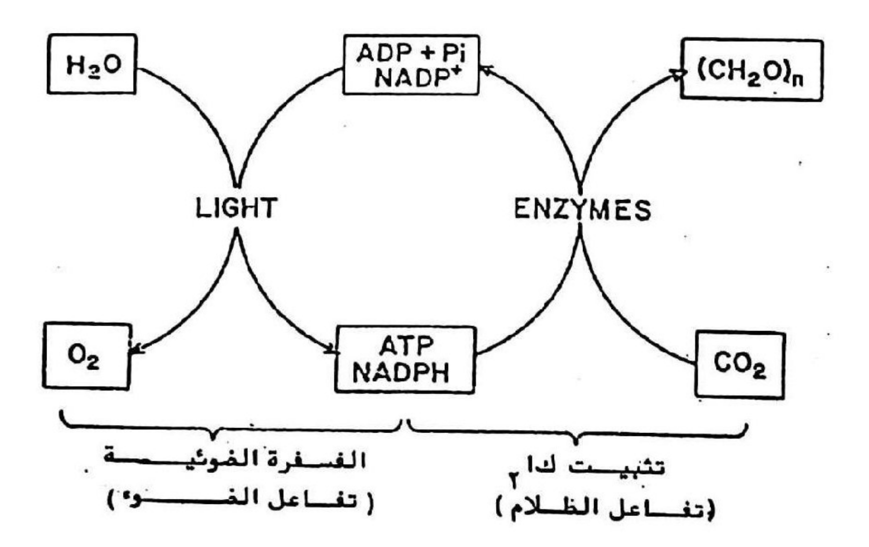
غشاء مزدوج، وتسمى أكياس البذيرة Thylokoids، وترى وكأنها بعض قطع العملة النقدية المتراصة بعضها فوق بعض، كما هو مبين بشكل (٢-٢)، وتعتبر البذيرات مناطق وجود الكلوروفيل الذي تتعلق جزيئاته بها بين طبقتين، إحداهما طبقة بروتين والأخرى طبقة ليبيدات. ويحدث في البذيرات التفاعلات الكيموضوئية في التمثيل الضوئي.



شكل (٢-٢). تركيب كلوروبلاستيدة (بلاستيدة خضراء) في النسيج المتوسط بورقة نبات الشعير.

تفاعلات الضوء والظلام Light and Dark Reaction

تمر عملية التمثيل الضوئي بسلسلة من التفاعلات يمكن تمييزها إلى نوعين من التفاعلات هما تفاعلات الضوء والظلام (شكل ٢-٣) كما يلي:



شكل (٢-٣). تفاعل الضوء والظلام في عملية التمثيل الضوئي.

أولا- تفاعل الضوء Light reaction

إن تفاعل الضوء أو التفاعل الكيموضوئي Photochemical reaction أو تفاعل هل Hill reaction وفيه:

١- تستعمل الطاقة الضوئية الساقطة من الشمس على الأجزاء الخضرية من النبات والتي تحتوي على كلوروبلاستيدات (أهمها الأوراق) في تكوين جزيئات غنية بالطاقة هي أدينوزين تراي فوسفات (١-٣ فو ATP). عن طريق الفسفرة الضوئية، ويستطيع الـ ATP توفير الطاقة بسهولة لاستعمالها في تفاعلات التمثيل الضوئي الأخرى، فعندما تنطلق مجموعة فوسفات من ATP تنطلق طاقة، وهذه الطاقة يمكن نقلها إلى عمليات أخرى في عملية التمثيل الضوئي.

٢- تستخدم الطاقة الضوئية في وجود الكلوروفيل في تحلل الماء (التحلل الضوئي للماء) الموجود في الكلوروبلاستيدات إلى أكسجين وأيدروكسيل وتكوين قوة مختزلة ممثلة في جزيئات النيكوتين أميد ثنائي النيكلوتيد فوسفات ($Nicotineamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH_2$).

ويمكن كتابة التفاعل الضوئي كما يلي:

$$4H_2O + 2NADP + 4NADP + 2Pi \xrightarrow[\text{Chlorophyll}]{\text{Light}} O2 + 2ATP + 2NADPH_2$$

وأن $NADPH_2$ و ATP هما الطاقة اللازمة لحدوث تفاعل الظلام والذي فيه يختزل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى كربوهيدرات.

ثانيا- تفاعل الظلام (تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون)

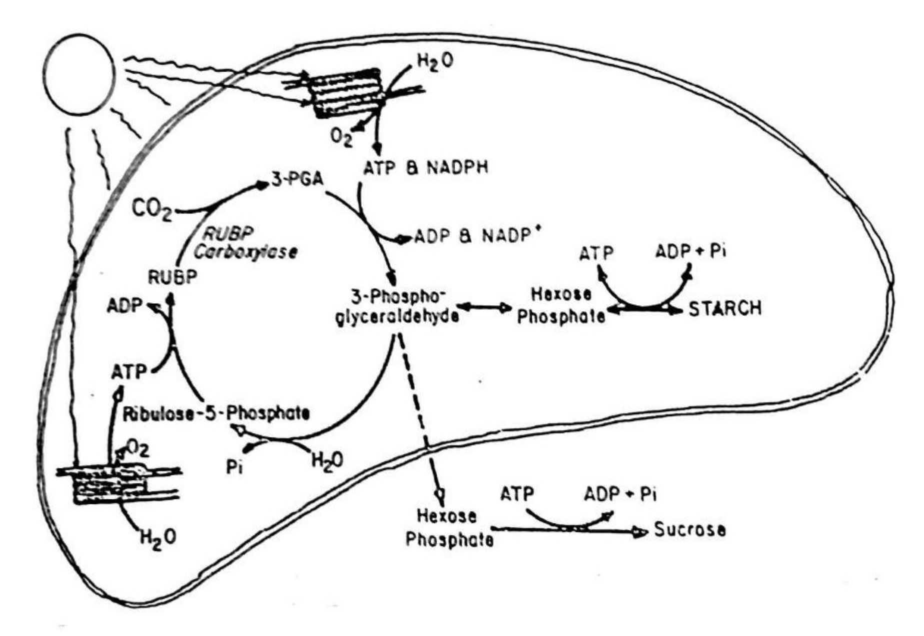
بعد إنتاج ATP والمرافق الإنزيمي المختزل $NADPH_2$ من التفاعل الكيموضوئي، يتم تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون واختزاله إلى مواد كربوهيدراتية. ويسلك غاز ثاني أكسيد الكربون أثناء إختزاله في تفاعلات الظلام مسارات مختلفة، متوقفا على نوع النبات، وهذه المسارات هي:

١- مسار كالفن، ٢- مسار هاتش وسلاك، ٣- مسار أيض حامض كراسيلاسيا.

١- مسار (مسلك) الكربون في دورة كالفن Calvin Pathway

إن مسار أو مسلك غاز CO_2 في عملية التمثيل الضوئي والذي يعتبر أساس معرفتنا لعملية التمثيل الضوئي قد أكتشف بواسطة كالفن ومساعدوه عام ١٩٥٧، ويوضح شكل (٢-٤) دورة كالفن. في هذه الدورة يستخدم جزئ ATP الذي قد تكون في الفسفرة الضوئية في تفاعلات الضوء في تحويل السكر الخماسي (ريبولوز-٥-فوسفات Ribulose-5-phosphate) إلى ريبولوز ثنائي الفوسفات Ribulose 1,5 phosphate (RUBP). ويتحد ريبولوز ثنائي الفوسفات مع CO_2 في وجود إنزيم Ribulose biphosphate carboxylase. ويتكون حامض الفوسفوجلسريك الثلاثي الكربون (PGA). ويعتبر سكر (RUBP) هو المستقبل الأول لغاز CO_2. بعد تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون، يستخدم ATP و NADPH2 الناتجة من تفاعل الضوء في تحويل حمض ٣-فوسفوجلسريك (3-PGA) إلى ٣-فوسفوجلسرالهيد (3-PGald) 3-phosphoglyceraldhyde.

يطلق على النباتات التي يأخذ فيها غاز CO2 هذا المسار عند تثبيته واختزاله بـ"**النباتات ثلاثية الكربون C3-plants**" لأن أول مركب ثابت يمكن الحصول عليه هو حمض الفوسفوجلسريك الثلاثي الكربون (3-PGA).



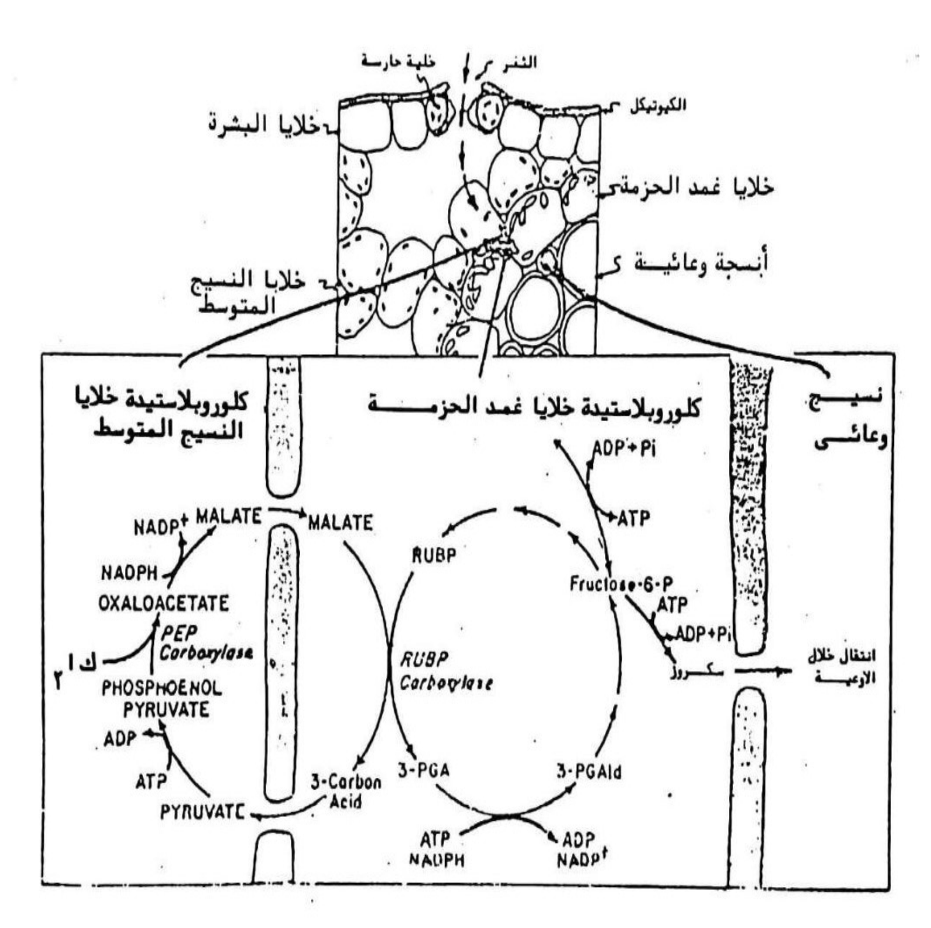
شكل (٢-٤). دورة كالفن، تثبيت CO_2 في النباتات ثلاثية الكربون.

٢- مسار (مسلك) الكربون في دورة هاتش وسلاك

لقد اعتبرت دورة كالفن هي المسلك أو المسار الوحيد لتثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون في النباتات الراقية في الفترة من ١٩٥٤-١٩٦٦، ثم جاء العالمان هاتش Hatch وسلاك Slack عام ١٩٦٦ في أستراليا، وأثبتا بالدليل القاطع أنه يوجد مسار آخر لتثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون في بعض الأنواع النباتية التي نشأت في المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية، ويعرف هذا المسار بمسار هاتش وسلاك Hatch and Slack pathway. وفي هذا المسار وجد أنه بدلا من التثبيت المباشر في دورة كالفن، فإن غاز ثاني أكسيد الكربون يحول إلى حمض عضوي رباعي الكربون في خلايا النسيج المتوسط للورقه والذي لديه القدرة على إعادة إنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون في كلوروبلاستيدات خلايا غمد الحزمة، وبعد ذلك تستطيع خلايا غمد الحزمة إستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تكوين الكربوهيدرات عن طريق مسار كالفن. ويمكن تلخيص خطوات هذه الدورة فيما يلي:

يتحول حمض البيروفيك Pyruvic acid إلى فوسفوإينول حمض البروفيك Phosphenol pyruvic acid بواسطة ATP الناتج من عملية الفسفرة الضوئية في تفاعل الضوء.

تحدث عملية كربكسلة لـPEP الثلاثي الكربون فيتحول إلى أحماض رباعية الكربون هي: الماليك Malic acid، وحمض الاسبارتك Aspartic acid، وحمض الأكسالوخليك Oxaloacetic acid، وذلك في وجود إنزيم Phosphoenol pyruvate carboxylase.



شكل (٢-٥). مسار الكربون في دورة هاتش وسلاك.

ثم تنتقل هذه الأحماض الرباعية إلى خلايا غلاف الحزمة Bundle sheath cells، حيث تحدث عملية نزع مجموعة كربوكسيل decarboxylation، وينتج CO_2 الناتج في خلايا غمد الحزمة مع الريبولوز

ثنائي الفوسفات، ويمثل من جديد، متخذا في ذلك مسار دورة كالفن، مكونا سكر ونشا. إن حمض البيروفيك (حمض ثلاثي الكربون) المتكون من حمض الماليك ينتقل إلى البلاستيدات الخضراء في خلايا النسيج المتوسط للورقة، ويحول إلى حمض PEP ، وهو المستقبل لغاز CO_2 .

ومن الجدير بالذكر، انه لوجود إنزيمات دورة كالفن في خلايا غمد الحزمة، يتكون نشا في هذه الخلايا، وهذا يعمل على فعالية تحولات المواد الكربوهيدراتية وسرعة إنتقالها إلى اللحاء، وأن الأنواع النباتية التي تسلك هذا المسار في تثبيت غاز CO_2 في عملية التمثيل الضوئي، تسمى "النباتات رباعية الكربون" لأن أول مركب ثابت ينتج في عملية التمثيل الضوئي في خلايا النسيج المتوسط للورقة هو مركب رباعي الكربون (شكل ٢-٥).

الفرق بين النباتات ثلاثية الكربون والنباتات رباعية الكربون

لقد سبق أن ذكرنا أن النباتات التي يسلك فيها CO_2 مسار دورة كالفن، تسمى بالنباتات ثلاثية الكربون (نباتات ك٣ C_3) لأن أول مركب ثابت أمكن الحصول عليه في عملية التمثيل الضوئي هو حمض الفوسفوجلسريك الثلاثي الكربون، ويبدأ منه تكوين بقية المركبات الأخرى. ولقد تواءمت النباتات ثلاثية الكربون مع الظروف الباردة الرطبة أو الدافئة الرطبة، وأهم محاصيل الحقل التابعة لهذه المجموعة: القمح، الشعير، الأرز، البطاطس، العدس، الحمص، الترمس، الحلبة، البرسيم المصري، والبرسيم الحجازي.

والنباتات التي يسلك فيها CO_2 مسار هاتش وسلاك تسمى بـ"النباتات باعية الكربون" (نباتات ك٤ C_4-plants) لأن أول مركب ثابت أمكن الحصول عليه في تفاعل الظلام هو حمض الأكسالوأسيتيك رباعي الكبون. ولقد تواءمت النباتات رباعية الكربون مع الظروف الحارة ةالجافة أو الظروف الرطبة، وأهم محاصيل الحقل التابعة لهذه المجموعة هي: قصب السكر، الذرة الشامية، الذرة الرفيعة، حشيشة السودان، وبعض أنواع الدخن وبعض أنواع الأتربلكس *Atriplex spp*. وفيما يلي الفرق بين النباتات ثلاثية الكربون والنباتات رباعية الكربون:

١- تتميز النباتات رباعية الكربون عن النباتات ثلاثية الكربون في بعض الصفات التشريحية والمميزة والتي لها دورها في مسار CO_2 أثناء تثبيته في عملية التمثيل الضوئي. وأهم هذه الصفات ما يلي:

أ- تحتوي النباتات رباعية الكربون على كلوروبلاستيدات في خلايا غمد الحزمة، بينما لا تحتوي النباتات ثلاثية الكربون عليها. وأن غمد الحزمة عبارة

عن النسيج المحيط بالحزم الصغيرة الممتدة في النسيج المتوسط للورقة (الميزوفيل)، ويتكون من طبقة واحدة أو أكثر من الخلايا المندمجة المحتوية على كلوروبلاستيدات. ويبين شكل (٣-٦) قطاعا عرضيا في ورقة نبات برسيم حجازي (نبات ثلاثي الكربون - ذو فلقتين) ونبات ذرة شامية (نبات رباعي الكربون – ذو فلقة واحدة).

ب-في النباتات ثلاثية الكربون يثبت غاز CO_2 بواسطة إنزيم ريبولوز داي فوسفات كربوكسيليز ويتجمع النشا في خلايا النسيج المتوسط، والمستقبل الأول لغاز CO_2 هو سكر الريبولوز ثنائي الفوسفات. أما في النباتات رباعية الكربون فإن غاز CO_2 يثبت بواسطة إنزيم فوسفوإينول بيروفيك كربوكسيليز، وتتكون أحماض رباعية الكربون، والتي تنتقل إلى خلايا غمد الحزمة، ولا يتكون نشا في خلايا النسيج المتوسط، والمستقبل الأول لغاز CO_2 هو حمض الفوسفوإينولبيروفيك.

٢- زيادة نشاط إنزيم فوسفوإينول بيروفيك كربوكسيليز في تثبيت CO_2 بالمقارنة بإنزيم ريبولوز داي فوسفات كربوكسيليز، ولذلك فإن الإنزيم الأول يمكنه أن يعمل بكفاءة أعلى في تركيزات منخفضة من CO_2 .

٣- إن تركيز CO_2 عند نقطة التعويض Compensation point في النباتات رباعية الكربون يتراوح بين صفر – ١٠ جزء في المليون، أما في النباتات ثلاثية الكربون فيتراوح بين ٥٠ – ١٥٠ جزء في المليون.

٤- تتميز النباتات الرباعية الكربون بنقص مقدار المحصلة النهائية لمقاومة إنتشار CO_2 من الجو إلى الكلوروبلاسستيدات بالمقارنة بالنباتات ثلاثية الكربون.

٥- تتميز النباتات رباعية الكربون بارتفاع صافي معدل التمثيل الضوئي (٤٠-٨٠ ملليجرام CO_2 / ديسيمتر مربع من السطح الورقي/ ساعة) عن مثيلتها في النباتات ثلاثية الكربون (١٥-٣٥ ملليجرام CO_2 / ديسيمتر مربع من السطح الورقي/ ساعة) وخصوصا تحت ظروف الكثافة الضوئية العالية.

٦- تتميز النباتات رباعية الكربون بانخفاض معدل التنفس الضوئي Photorespiration بدرجة كبيرة، بعكس النباتات ثلاثية الكربون والتي تتميز بارتفاع معدل التنفس الضوئي بدرجة واضحة، ففي النباتات ثلاثية الكربون حوالي ٢٠-٢٥ % من الكربون المثبت يستعمل في التنفس الضوئي، مما يؤدي إلى نقص صافي معدل التمثيل الضوئي في هذه النباتات بالمقارنة بالنباتات رباعية الكربون.

٧- إن درجة الحرارة المثلى لصافي معدل التمثيل الضوئي في النباتات ثلاثية الكربون، تكون بوجه عام أقل من ٢٥ ºم، بينما تتراوح بين ٣٠-٤٠ ºم في النباتات رباعية الكربون.

٨- تصل النباتات الثلاثية الكربون إلى أقصى معدل لصافي عملية التمثيل الضوئي عند كثافة ضوئية منخفضة نسبيا أو أقل من ضوء الشمس الكامل، وعلى العكس من ذلك فإن صافي معدل التمثيل الضوئي في النباتات رباعية الكربون يزداد بزيادة الكثافة الضوئية حتى ضوء الشمس الكامل (ضوء الشمس الكامل وقت الظهيرة في يوم صيف صافي خالي من الغيوم في المناطق المعتدلة تصل شدته إلى ١٢٠٠٠ شمعة/ قدم).

٩- إن النباتات ثلاثية الكربون تصل إلى أقصى معدل لصافي عملية التمثيل الضوئي عندما يظل تركيز الأكسجين عند مستوى منخفض جدا (من صفر – ٢%)، بينما لا يؤثر تركيز الأكسجين على صافي معدل التمثيل الضوئي للنباتات رباعية الكربون، إذ أن صافي معدل التمثيل الضوئي يبقى دون تغيير في مجال واسع من تركيز الأكسجين (صفر – ٢١%).

١٠- النباتات رباعية الكربون أكثركفاءة في إستخدام الماء من النباتات ثلاثية الكربون ولذلك فتعتبر أكثر تحملا لنقص الرطوبة الأرضية.

٣- مسار (مسلك) أيض حامض كراسيلاسيا (الأيض الحمضي للنباتات العصارية المتشحمة أو الأيض الحمضي التشحمي)

إن بعض النباتات العصرية Succulent مثل الصبار (الأجاف) Agave من النباتات رباعية الكربون والتي تثبت غاز CO_2 في حمض الماليك، ولكن هذه النباتات ليس لها التركيب التشريحي الخاص بنباتات ك٤، إذ لا يوجد بأوراقها غلاف الحزمة. ونظرا إلى أن النباتات العصارية تحفظ ثغورها مغلقة أثناء النهار وتفتح أثناء الليل (وذلك لتقليل النتح وفقد الماء) فإنها تثبت غاز CO_2 أثناء الليل في صورة أحماض عضوية، ثم تتحول هذه الأحماض العضوية إلى مواد كربوهيدراتية أثناء النهار داخل النسيج المتوسط للورقة، وهذه النباتات العصيرية ذات قدرة عالية على النمو في المناطق الصحراوية الجافة.

الورقة كعضو تمثيل ضوئي

تمثل الورقة عضو التمثيل الضوئي الهام في النباتات الراقية، وأوراق معظم نباتات محاصيل الحقل ذات تركيب ذو كفاءة عالية في اعتراض وامتصاص الطاقة الضوئية وغاز CO_2 في عملية التمثيل الضوئي. وتتميز أوراق معظم نباتات محاصيل الحقل بالصفات الآتية:

١- السطح الخارجي للورقة منبسط وعريض ورقيق، وهذا يسمح باعتراض أكبر قدر من الضوء لكل وحدة حجم من الورقة، ودقة نصل الورقة يعمل على تقليل المسافة التي يجب أن يخترقها غاز CO_2 من سطح الورقة إلى الكلوروبلاستيدات.

٢- يغطي السطح العلوي والسفلي للورقة بواسطة البشرة التي تحمي الأنسجة الداخلية من الأضرار الميكانيكية ومن الجفاف، كما تغطي البشرة العليا والسفلى للورقة بواسطة أديم واقي Cuticle مكون من مادة شمعية هي الكيوتين. وأن كلا من الأديم والبشرة منفذ للضوء، فيسمحان بنفاذ الضوء داخل الورقة، بينما لا تسمح طبقة الأديم بتبادل الغازات بين الورقة والجو المحيط كما تمنع مرور الماء أو بخار الماء، وهذا يعتبر هاما في منع فقد الماء من الورقة.

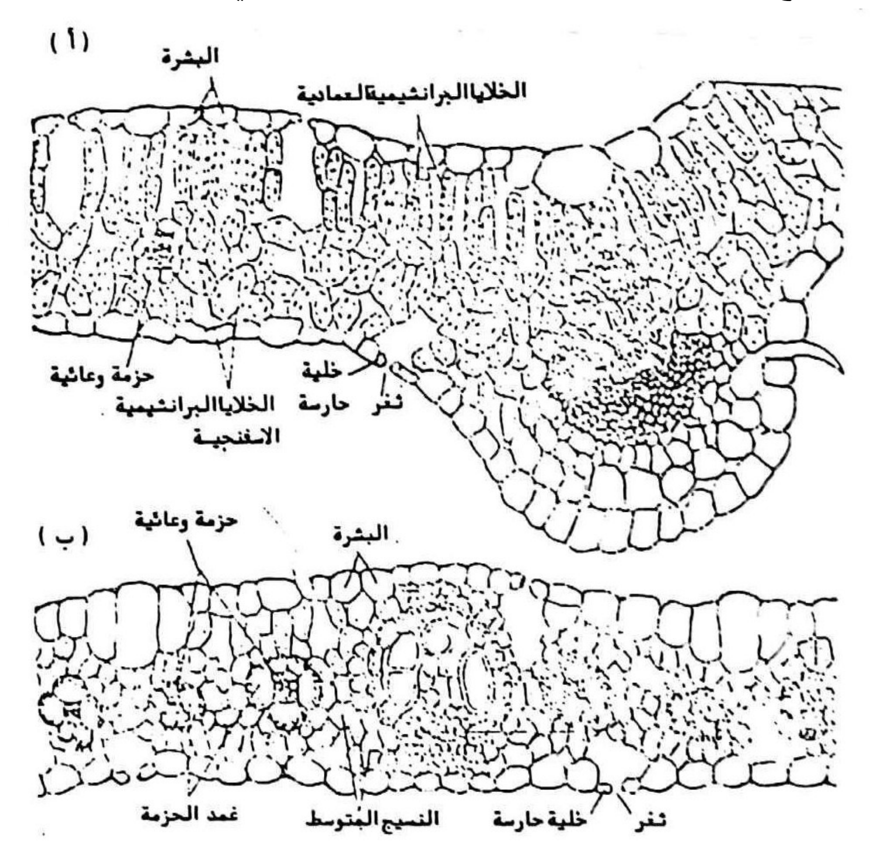
٣- تحتوي الأوراق على العديد من الثغور في وحدة المساحة من السطح الورقي (١٢ – ٢٨١ ثغر/ مم^2) والتي تسمح بانتشار أقصى كمية من غاز CO_2 داخل الورقة عندما تكون الثغور مفتوحة. وتحيط الخلايا الحارثة بفتحة الثغر والتي تتحكم في فتح وقفل الثغور.

٤- تحتوي الورقة على العديد من خلايا النسيج المتوسط والفراغات البينية (شكل ٢-٦) وهذا يؤدي إلى زيادة السطح الداخلي للورقة، كما تعمل الفراغات البينية في النسيج المتوسط على سرعة انتشار غاز CO_2 من الثغر إلى أسطح الخلية.

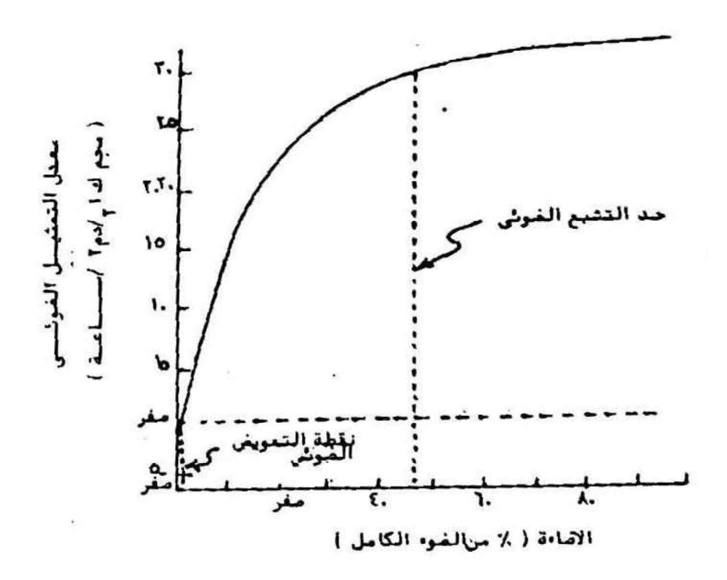
٥- تحتوي خلايا النسيج المتوسط على العديد من الكلوروبلاستيدات (٢٠-١٠٠ كلوروبلاستيدة بكل خلية) والتي يتم فيها تفاعل الضوء. وعندما يسقط الضوء على الورقة فإن البلاستيدات الخضراء تتجمع على امتداد جدار الخلية في وضع يسمح لها باعتراض أكبر كمية من الضوء الساقط على الورقة تحت ظروف الإضاءة الضعيفة، وعلى العكس من ذلك تحت شدة الإضاءة العالية، إذ تأخذ وضعا يسمح لها باعتراض أقل كمية من الضوء الساقط، كما أن قرب

الكلوروبلاستيدات (البلاستيدات الخضراء) من جدار الخلية يسهل الانتشار السريع لغاز CO_2 من جدار الخلية إلى الكلوروبلاستيدات.

٦- وجود الأنسجة الوعائية بالورقة قريبا من خلايا النسيج المتوسط (شكل ٢-٦)، وهذا يسمح بسرعة حركة الماء والعناصر المعدنية إلى خلايا التمثيل الضوئي، ونقل ناتجات التمثيل الضوئي من هذه الخلايا ومن الورقة إلى الأجزاء الأخرى من النبات، إذ أن البطء في حركة الماء والعناصر المعدنية إلى الكلوروبلاستيدات أو نقل ناتجات التمثيل الضوئي من الكلوروبلاستيدات إلى خارج الورقة يمكن أن يقلل من معدل التمثيل الضوئي.



شكل (٢-٦). أ- قطاع عرضي في ورقة نبات البرسيم الحجازي (نبات ثلاثي الكربون – ذو فلقتين)، ب- قطاع عرضي في ورقة نبات الذرة الشامية (نبات رباعي الكربون – ذو فلقة واحدة).



شكل (٢-٧). استجابة عملية التمثيل الضوئي لشدة الإضاءة في نبات البرسيم (نبات ثلاثي الكربون).

العوامل المؤثرة على عملية التمثيل الضوئي

تؤثر العديد من العوامل على عملية التمثيل الضوئي وانتاج المادة الجافة لنباتات المحاصيل، وتنقسم هذه العوام إلى مجموعتين هما: العوامل البيئية والعوامل الخاصة بالنبات.

أولا- تأثير العوامل البيئية على عملية التمثيل الضوئي

إن أهم العوامل البيئية التي تؤثر على معدل التمثيل الضوئي هي شدة الإضاءة، ودرجة الحرارة، وتركيز غاز ثاني أكسيد الكربون، والماء، والعناصر المغذية.

أولا- تأثير الضوء

الضوء يعتبر العامل المحدد لإنتاجية النباتات في الزراعة ولا تحدث عملية التمثيل الضوئي في نباتات محاصيل الحقل في غياب الضوء غالبا، وإذا كانت النباتات معرضة لشدة إضاءة ضعيفة فإن معدل عملية التمثيل الضوئي

لمثل هذه النباتات يزداد تدريجيا بزيادة شدة الإضاءة حتى تصل شدة الإضاءة إلى نقطة التعويض الضوئي Light compensation point والتي تعرف بأنها عبارة عن شدة الإضاءة التي عندها تكون كمية امتصاص CO_2 في عملية التمثيل الضوئي مساوية لكميته المنطلقة من التنفس (صافي معدل التمثيل الضوئي = صفر)، ونقطة التعويض الضوئي هذه تختلف من نوع نباتي إلى آخر، ويجب أن يتجاوز النبات هذه النقطة لكي ينمو ويتطور، وإذا استمرت شدة الإضاءة في الزيادة عن نقطة التعويض الضوئي فإن معدل عملية التمثيل الضوئي يزداد حتى تصل شدة الإضاءة إلى نقطة التشبع الضوئي Light saturation point (شكل ٢-٧) وتعرف بأنها عبارة عن شدة الإضاءة التي عندها لا تؤدي أي زيادة في شدة الإضاءة عن هذه النقطة إلى زيادة معنوية في معدل التمثيل الضوئي. وتحت الظروف الطبيعية في الحقل، حيث توجد النباتات متكاثفة مع بعضها وتظلل بعضها البعض كما تظلل الأوراق العليا مثيلتها السفلى على النبات، فإن النباتات تحتاج إلى شدة إضاءة أعلى مما تحتاجه النباتات المنزرعة منفردة، وذلك للوصول إلى أقصى معدل تمثيل ضوئي تحت ظروف الحقل.

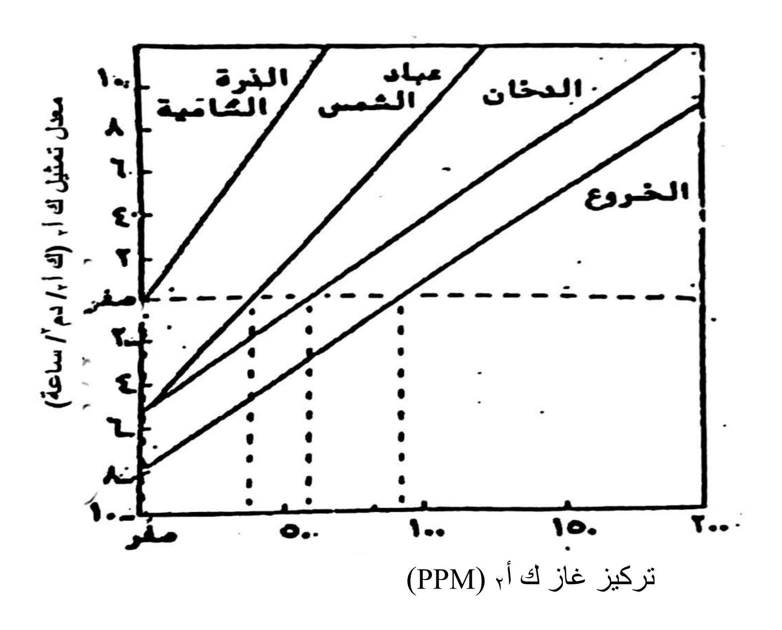
وتختلف الأنواع النباتية المختلفة في درجة استجابتها لشدة الإضاءة. ففي معظم النباتات رباعية الكربون يزداد معدل التمثيل الضوئي بزيادة شدة الإضاءة تدريجيا حتى تصل شدة الإضاءة إلى ضوء الشمس الكامل، بينما تصبح معظم النباتات ثلاثية الكربون مشبعة ضوئيا قبل أن تصل شدة الإضاءة إلى ضوء الشمس الكامل.

ثانيا- تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون

يبلغ تركيز غاز CO_2 في الهواء الجوي ٠.٠٣% (٣٠٠ جزء في المليون)، ويكون هذا التركيز ثابت تقريبا عند سطح البحر، ويرجع ثبات نسبة CO_2في الهواء الجوي إلى وجود مصادر أخرى لهذا الغاز خلاف تنفس النباتات والحيوانات، مثل احتراق مواد الوقود، وتحلل المخلفات العضوية بواسطة البكتريا، والنشاط البركاني وغيرها. وتحت الظروف العادية والتي تتمتع فيها نباتات المحاصيل تحت ظروف الحقل بوفرة ضوء الشمس والماء ودرجة الحرارة المناسبة اللازمة لعملية التمثيل الضوئي، فإن هذه النسبة من غاز CO_2 (٠.٠٣%) لا تكفي لتشبيع النباتات باحتياجاتها منه. وعلى الرغم من أن تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي يعتبر ثابتا (٠.٠٣% تقريبا)، إلا أن هذه النسبة تتأثر في أماكن التمثيل الضوئي النشط والمكثف مثل أعلى

أسطح الغابات مباشرة أو فوق حقول الذرة الشامية، إذ وجد أن تركيز غاز CO_2 يقل بدرجة ملحوظة أثناء ساعات النهار، ولقد وجد أن تركيز غاز CO_2 على بعد ١٠٠ متر من سطح حقل ذرة شامية يقل من ٠.٠٦٨% أثناء الليل إلى تركيز قدره ٠.٠٤٥% في الصباح، ويرجع هذا الإنخفاض أثناء النهار إلى عملية التمثيل الضوئي. ولذلك فقد وجد أن زيادة تركيز غاز CO_2 يؤدي إلى زيادة واضحة في عملية التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل (الدخان، الذرة الشامية، وعباد الشمس كما هو مبين بشكل (٢-٨).

ويمكن زيادة كمية محصول نباتات محاصيل الحقل زيادة معنوية بزيادة تركيز غاز CO_2 في الجو المحيط حتى ١٥٠٠ جزء في المليون (٠.١٥ %). ولقد دلت التجارب على ازدياد انتاج بعض محاصيل الحقل بزيادة نسبة غاز CO_2 في الجو المحيط بها، ولقد أمكن التوصل إلى كمية كبيرة من محصول الذرة الشامي (حوالي ٤٠ أردب /فدان تقريبا) في بعض المناطق في الهند، نتيجة وضع مكعبات من CO_2 في صورة مجمدة وزنها رطل واحد، وتبعد عن بعضها بمسافة ٧.٥ متر في الحقل المنزرع بالذرة (Gupta, 1978). وبوجه عام، قد أدت زيادة تركيز CO_2 في الصوب الزجاجية فوائد كبيرة في زيادة كمية محصول النباتات المنزرعة بها.



شكل (٢-٨). استجابة معدل التمثيل الضوئي في أربعة أنواع نباتية مختلفة لتركيز CO_2 في ظروف ضوئية مثلى (ضوء الشمس الكامل).
(عن جاردنر وآخرون، ١٩٨٥)

المقاومات التي تواجه CO_2 أثناء انتشاره إلى الكلوروبلاستديات

يلزم انتقال غاز CO_2 من الهواء الجوي إلى الكلوروبلاستيدات حتى تقوم النباتات بعملية التمثيل الضوئي، ومن المعروف أن الغازات تنتشر أو تنتقل من الوسط الأكثر تركيزا إلى الوسط الأقل تركيزا، أو بمعنى آخر ينتشر الغاز من المنطقة التي يزيد فيها الضغط الانتشاري إلى المنطقة التي يقل فيها، وتزداد سرعة الانتشار بازدياد مقدار الفرق في الضغط الانتشاري. ولما كانت النباتات تستنفذ غاز CO_2 من الهواء بالمنطقة المجاورة له مباشرة، فإنه ينشأ عنه ميل أو تدرج في تركيز CO_2 على طول المسار من المنطقة المحيطة بالأوراق إلى الكلوروبلاستيدات، مما ينشأ عنه انتقال غاز CO_2 إلى الكلوروبلاستيدات من الجو.

وعموما- يواجه انتشار غاز CO_2 من الجو إلى الكلوروبلاستيدات بخلايا النبات مقاومات، هي مقاومة الطبقة المحيطة بالورقة، ومقاومة الثغر، ومقاومة النسيج المتوسط شكل (٢-٩)، ولقد أمكن التعبير عن هذه المقاومات بالمعادلات الآتية:

$$r = r_a + r_s + r_m$$

حيث أن:

r = معدل انتشار CO_2

r_a = مقاومة الطبقة المحيطة

r_s = مقاومة الثغر

r_m = مقاومة النسيج المتوسط

١- مقاومة الطبقة المحيطة

توجد طبقة رقيقة جدا من الهواء غير مضطربة تلاصق سطح الورقة ويقل معدل انتشار غاز CO_2 بازدياد سمك هذه الطبقة، كما وجد أنه كلما قل تركيز غاز CO_2 بالجو المحيط بالورقة، كلما زادت مقاومة هذه الطبقة، ولذلك فإن العوامل التي تؤدي إلى نقص تركيز CO_2 بالجو المحيط بالورقة تعمل على زيادة مقاومة هذه الطبقة المحيطة، وتحت ظروف الحقل إذا حدث اضطراب لهذه الطبقة عن طريق الرياح فإن مقاومة هذه الطبقة لغاز CO_2 تقل.

٢- مقاومة الثغر

يواجه انتشار غاز CO_2 مقاومة الثغر وذلك بعد مقاومة الطبقة المحيطة، وهي عبارة عن المقاومة التي يواجهها CO_2 أثناء انتشاره من خارج الورقة

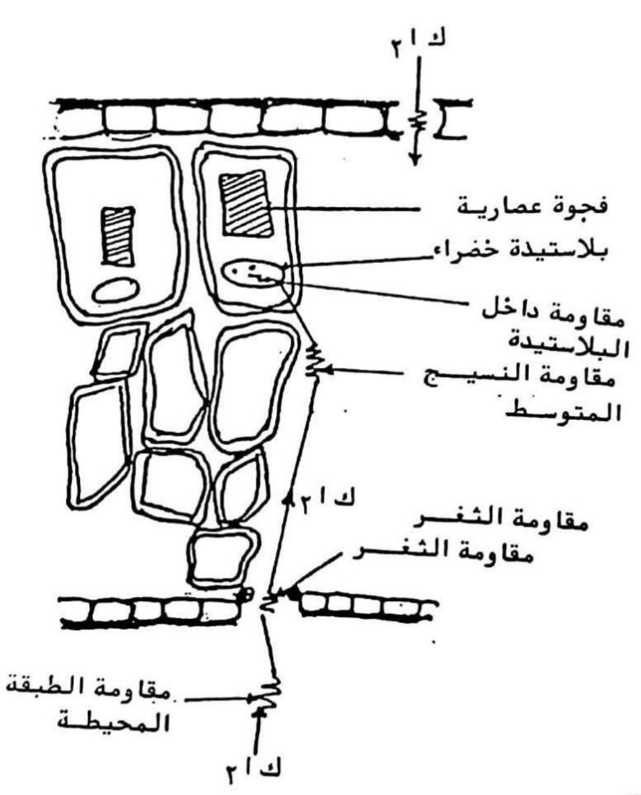
خلال فتحة الثغر. وأن العامل الرئيسي الذي يؤثر على مقاومة الثغر هو انفتاحة. وتؤثر الإضاءة ودرجة الحرارة والرطوبة الأرضية على انفتاح الثغر.

٣- مقاومة النسيج المتوسط للورقة (الميزوفيل)

إن مقاومة النسيج المتوسط لانتشار غاز CO_2 عبارة عن كل المقاومات التي تواجه غاز CO_2 إلى الكلوروبلاستيدات ماعدا مقاومة الطبقة المحيطة/ ومقاومة الثغر، ويتضح ذلك من العادلة الآتية:

$$r_m = r_{CO2} - r_a - r_s$$

حيث أن: r_a، r_s، r_m عبارة عن مقاومة الميزوفيل، ومقاومة الطبقة المحيطة، ومقاومة الثغر على الترتيب، r_{CO2} عبارة عن معدل انتشار غاز CO_2 داخل الورقة.

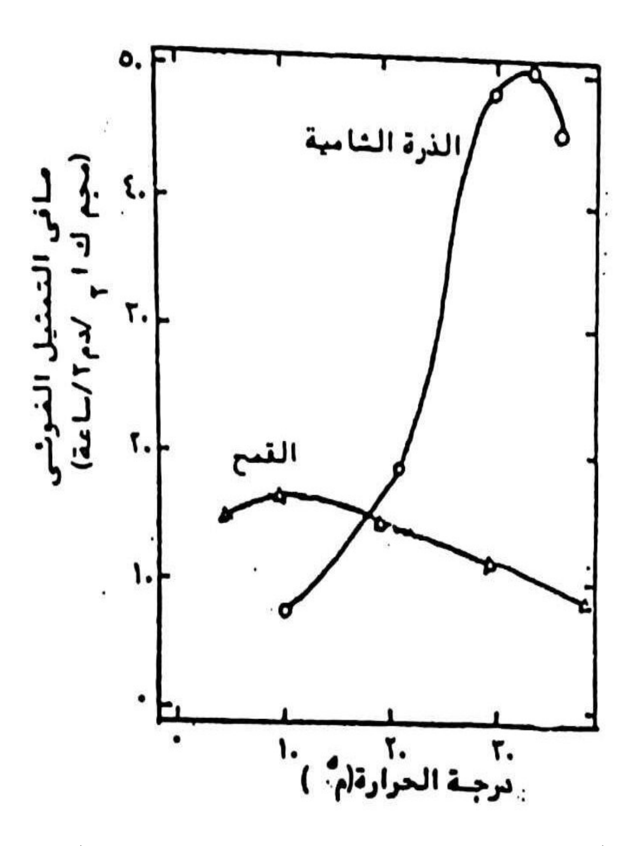


شكل (٢-٩). المقاومات التي يواجهها انتشار غاز CO_2 من خارج النبات إلى الكلوروبلاستيدة (Leopold and Kriedeman, 1981).

وعموما- يمكن القول أن أي عامل يؤثر على تثبيت CO_2 سوف يؤثر على تركيزه في الكلوروبلاستيدات، والذي بدوره يؤثر على المعدل الكلي لانتشاره.

ثالثا- تأثير درجة الحرارة

ان تفاعل الضوء في عملية التمثيل الضوئي لا يعتمد على درجة الحرارة وذلك في المجال الحراري الذي تنمو فيه النباتات، وعل العكس من ذلك فإن تفاعل الظلام (الكيموحراري) والذي تقوم به الإنزيمات يعتمد على درجة الحرارة، ويزداد بزيادة درجة الحرارة، حتى تصل درجة الحرارة الذي يحدث عنده هدم البروتين، ولقد وجد أن تأثير درجة الحرارة على عملية التمثيل الضوئي يماثل تأثيرها على النشاط الإنزيمي، وهذا يدل على أن تثبيط الإنزيمات هو أحد أسباب تثبيط التمثيل الضوئي في درجات الحرارة المرتفعة.



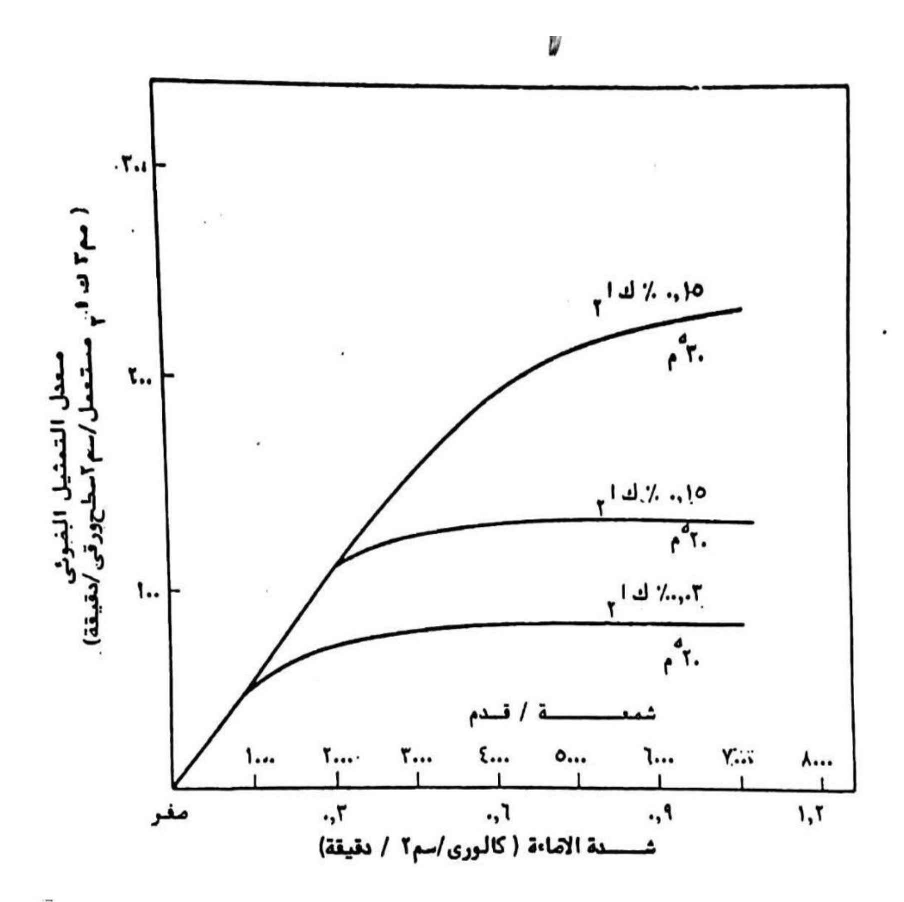
شكل (٢-١٠). تأثير درجات الحرارة على صافي التمثيل الضوئي بالأوراق الفردية لنباتات الذرة الشامية والقمح. (From: Moss, 1963 and Murata and Iyama, 1963).

وعموما- يزداد معدل التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل بزيادة درجة الحرارة، عندما تكون العوامل الأخرى غير محددة، ثم يقل المعدل بزيادة درجة الحرارة حتى يصل إلى معدل الحرارة المثلى، والتي بعدها يقل معدل التمثيل الضوئي (شكل ٢-١٠). وتعتمد درجة الحرارة المثلى على نوع النبات، وكذلك على طول الفترة التي تتعرض لها النباتات لدرجة الحرارة، وعلى سبيل المثال، في النباتات ثلاثية الكربون، يثبط تمثيل غاز CO_2 عادة على درجة حرارة تتراوح بين ٢٥-٣٥ْم، أما في بعض النباتات رباعية الكربون فيثبط تمثيل غاز CO_2 على درجة حرارة أعلى من ٣٥ْم.

تأثير التفاعل بين الضوء ودرجة الحرارة و CO_2

إن صافي التمثيل الضوئي لورقة مفردة محتوية على نسبة عالية من الماء يزداد بزيادة شدة الإضاءة إلى أن يصبح عاملا آخر محددا للتمثيل الضوئي مثل تركيز غاز CO_2 أو درجة الحرارة، ويبين شكل (٢-١١) تأثير درجة الحرارة، والضوء، وتركيز CO_2 على معدل التمثيل الضوئي. يتضح من شكل (٢-١١) أنه عند كثافة ضوئية أقل من ٠.٣ كالوري/ سم^{٢}/ دقيقة يزداد معدل التمثيل الضوئي بزيادة شدة الإضاءة، ولا يكون لدرجة الحرارة تأثيرا يذكر.

ويلاحظ من شكل (٢-١١) أنه عندما يزداد تركيز CO_2 في الهواء المحيط إلى ٠,١٥% فإن معدل التمثيل الضوئي يزداد بزيادة شدة الإضاءة حتى تصل إلى ٠,٦ كالوري/ سم^{٢}/ دقيقة، ثم تتوقف هذه الزيادة بعد ذلك، وأن زيادة شدة الإضاءة عن ذلك لا يكون لها تأثير على معدل التمثيل الضوئي، وتصل الورقة إلى درجة التشبع الضوئي، ولكن في هذه الحالة يمكن زيادة معدل التمثيل الضوئي بزيادة درجة الحرارة من ٢٠ - ٣٠ْم، إذ أن معدل عملية التمثيل الضوئي عند شدة إضاءة مقدارها ٠,٩ كالوري/ سم^{٢}/ دقيقة وفي التركيزات العالية من CO_2 (٠.١٥%) فإن معدل التمثيل الضوئي عند درجة حرارة ٣٠ْم يكون غالبا ضعف مثيله عند ٢٠ْم، أي أن استجابة عملية التمثيل الضوئي لدرجة الحرارة تتوقف على شدة الإضاءة وتركيز CO_2 المرتفع (أعلى من ٠.٠٣%).



شكل (۲-۱۱). تأثير شدة الإضاءة، وثاني أكسيد الكربون، ودرجة الحرارة على معدل التمثيل الضوئي (عن Noggle و Fritz عام ۱۹۸۲).

رابعا- تأثير الماء

يعتبر الماء ضروريا لعملية التمثيل الضوئي، إذ يعتبر جزءا هاما في التفاعلات الكيموضوئية، ولكن حوالي ۰.۱% فقط من الكمية الكلية للماء الممتص بواسطة النبات تستعمل في عملية التمثيل الضوئي، ويعتبر النتح هو المسئول عن ۹۹% من كمية الماء المستعمله بواسطة النباتات، وحوالي ۱% تستعمل لتميؤ النبات، ولذلك فإن التأثير الأساسي لنقص الماء على التمثيل الضوئي هو زيادة مقاومة الثغور ونقص امتصاص CO_2 ، وإذا نقص الماء بدرجة كبيرة فإن مقاومة النسيج المتوسط تزداد بسبب الضرر الدائم لجهاز التمثيل الضوئي بالتفصيل في الباب التاسع بمشيئة الله.

خامسا- تأثير العناصر الغذائية

تؤدي إضافة بعض العناصر الغذائية للنبات إلى زيادة معدل التمثيل الضوئي. وعلى سبيل المثال، يؤثر البوتاسيوم على درجة تدفق غاز CO_2 إلى داخل الورقة، وكذلك على حركة الثغور. ويعمل النيتروجين على زيادة معدل التمثيل الضوئي للنباتات عن طريق نقص مقاومة الورقة لغاز CO_2 أثناء انتشاره داخل الورقة، كما أنه يعمل على زيادة مساحة السطح الورقي للنبات، وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة سطح التمثيل الضوئي.

إن نقص محتوى النباتات من بعض العناصر الغذائية يؤثر على التمثيل الضوئي أساسا عن طريق التأثير على جهاز التمثيل الضوئي، وعلى سبيل المثال، يحتوي الكلوروفيل على كل من النيتروجين والمغنسيوم، فإذا كانت إضافة هذه العناصر للنباتات محدودة، وحدث نقصا شديدا في النباتات، فقد لا يتكون الكلورفيل، فإذا لم يكن عنصر الحديد موجودا بالنبات فلا يتكون الكلورفيل.

ثانيا- تأثير العوامل الخاصة بالنبات على عملية التمثيل الضوئي

يختلف معدل التمثيل الضوئي اختلافا كبيرا في محاصيل الحقل المختلفة حتى ولو نمت نباتات هذه المحاصيل تحت ظروف بيئية متشابهة. لإن هذه الإختلافات في معدل التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل المختلفة في صفاتها التركيبية، والتشريحية، والفسيولوجية، والمورفولوجية. وسوف نذكر فيما يلي تأثير بعض هذه الصفات على عملية التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل:

١- عمر الورقة ومحتواها من العناصر الغذائية

يتأثر معدل التمثيل الضوئي بعمر الورقة، إذ يصل إلى أقصاه عندما يتم نموها، ويصل انبساطها إلى حده الأقصى، ثم يقل معدل التمثيل بها بمرور الوقت. ولقد وجد أن الأوراق المسنة السفلى على نبات الذرة الشامية ذات معدل تمثيل ضوئي أقل من الأوراق العليا حديثة العمر، ولقد وجد أن الأوراق السفلى على النبات ذات محتوى أقل من البوتاسيوم، والنيتروجين والمغنسيوم بالمقارنة بالأوراق العليا حديثة العمر.

٢- تركيب الورقة

يؤثر تركيب الورقة في النباتات المختلفة على مقدار مقاومة الأدمة والثغور والنسيج المتوسط إلى غاز CO_2 أثناء انتشاره إلى البلاستيدات الخضراء، وهذا يؤثر بدوره على معدل عملية التمثيل الضوئي، وعلى سبيل المثال، يؤدي نقص محصلة المقاومات الداخلية للورقة في النباتات رباعية الكربون إلى زيادة معدل التمثيل الضوئي عنه في النباتات ثلاثية الكربون.

٣- تركيز ناتجات التمثيل الضوئي ومعدل انتقالها

إن زيادة تركيز ناتجات التمثيل الضوئي (السكريات) بالأوراق نتيجة لتراكمها بالورقة، يؤدي إلى نقص معدل التمثيل الضوئي بهذه الأوراق. ويحدث هذا التراكم نتيجة نقص المصب (الجزء من النبات الذي تنتقل إليه ناتجات التمثيل)، مثل إزالة كيزان الذرة الشامية أو نورات القمح أو درنات البطاطس.

٤- شكل الكلوروبلاستيدات وتركيبها وتوزيعها بالخلايا

من المعروف أنه لا يتم التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل إلا في وجود الكلوروبلاستيدات، ويؤثر شكل الكلوروبلاستيدات وتركيبها وتوزيعها بالخلايا على معدل التمثيل الضوئي للنباتات المختلفة.

٥- زاوية الورقة

تؤثر زاوية الورقة على معدل التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل المنزرعة تحت الظروف الطبيعية لنموها في الحقل، وسوف نوضح ذلك في الباب الثالث إن شاء الله.

الاستفادة من المواد الغذائية الممثلة بواسطة النبات

إن عملية التمثيل الضوئي تنتهي بتكوين السكر السداسي (الهكسوز)، إلا أنه بعد ذلك تحدث تغيرات عديدة على السكر السداسي، إذ يتحول سكر الجلوكوز إلى الفركتوز، أو يتحدا معا لتكوين سكروز ينتقل إلى الخلايا الأخرى، أو يحدث تكثف لهذه السكريات، ويتكون النشا، والذي يخزن تخزينا مؤقتا في البلاستيدات الخضراء، وقد يستخدم السكروز في تكوين جدر الخلايا، إذ قد يتحول إلى مكونات تركيبية (بنائية) Structural Components مثل السليولوز، الذي يدخل في تركيب جدر الخلايا. وقد ينتقل السكروز أيضا إلى مناطق أخرى من النبات، حيث مناطق النمو النشطة مثل قمم الجذور

والسيقان أو الأوراق النامية في المراحل الأولى من تكوينها، أو يتحول إلى سكريات عديدة، أو يتحول إلى مكونات تركيبية.

التنفس والنمو في نباتات المحاصيل

تحتاج الخلية النباتية إلى طاقة لكي تقوم بعملياتها الحيوية من تحول غذائي، أو نقل نشط أو غيرها. وتحصل الخلية على احتياجاتها من الطاقة من هدم المواد الغذائية المعقدة، على خطوات متتابعة في عملية التنفس. ويتم هذا الهدم أو التنفس في ظروف هوائية أو لاهوائية، وتعتمد عمليات الهدم هذه أساسا على الإنزيمات. والطاقة الناتجة تستخدم في تسيير التفاعلات البنائية المختلفة بالنبات، وفي تخليق مركبات بها روابط الفوسفات الغنية بالطاقة، والموجودة في جزئ أدينوزين تراي فوسفات (١-٣ فو Adenosine triphosphate, ATP).

ويتم هدم المواد الغذائية على خطوات متتالية إلى مواد يسهل على الخلية الاستفادة منها. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الطاقة المنطلقة في التنفس لا تفقد ولكنها تخزن لحين استعمالها مرة أخرى، وتخزن عادة في أدينوزين تراي فوسفات (ATP)، وتتراوح الطاقة المنطلقة الحرة عند تحليل رابطة الفوسفور النهائية من ٧-١٢ كيلو كالوري لكل مول من ATP ولذلك يشار إلى هذه الرابطة الفوسفاتية النهائية، بأنها رابطة ذات طاقة عالية.

ولا تنقل الطاقة إلى ATP كلية ولكن في بعض الأحيان عند إزالة ذرة هيدروجين من المواد الغذائية، فإنها ترتبط مع مستقبل للهيدروجين. وتنقل جزء من الطاقة إلى الرابطة التي توجد بين الهيدروجين والمستقبل. ومن أهم المواد المستقبلة للهيدروجين هو نيكوتين أميد أدينين داي نيوكليوتيد Nicotine amide adenine dinucleotide, NAD.

إن الهكسوزات هي المواد الأساسية التي تؤكسد عادة في خلايا النباتات الحية، ولكن عندما تحتوي خلايا النباتات على مواد غذائية معقدة فيجب أن تتحول إلى صورة بسيطة قبل استعمالها في التنفس، فمثلا النشا يتحلل أولا إلى هكسوز، والدهون تتحلل إلى أحماض دهنية وجليسرول، والبروتينات تتحلل إلى أحماض أمينية.

وعموما- يحول التنفس المواد الغذائية في وجود الأكسجين إلى ثاني أكسيد الكربون وماء وطاقة، ويصحب ذلك تولد حرارة.

ويدخل الهكسوز الناتج من عملية التمثيل الضوئي في عملية التنفس بالخلية، حيث يهدم وتتحرر طاقة، أو يتحول إلى مركبات عضوية تستعمل في تكوين:

١- مكونات بنائية مثل السليولوز، والهيميسيليولوز، والبكتين وغيرها.
٢- مكونات خلوية نشطة (أيضية) مثل الأحماض النووية، والانزيمات، والكلوروفيل، والسيتوكروم، والفوسفوليبيدات، وغيرها.
٣- مكونات مخزنة مثل النشا، والبروتينات، والليبيدات، وغيرها.

الفرق بين عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس

إن عملية التمثيل الضوئي والتنفس تتشابهان في بعض النواحي وتختلفان في نواح أخرى، كما يتضح في جدول (٢-١): كما يلي:

١- تستخدم طاقة للتمثيل في كل من عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس، ولكن في التنفس تتهدم مواد عضوية للحصول على الطالقة اللازمة لعملياته المختلفة مثل تمثيل المواد الغذائية، والمواد التركيبية، والكونات الأيضية (الخلوية النشطة)، وللعمليات الأخرى، مثل نقل العناصر المعدنية والمواد العضوية عبر الأعضاء المختلفة بالنبات. أي أن التنفس يستمد الطاقة اللازمة له من المواد الغذائية الممثلة في عملية التمثيل الضوئي.

٢- إن عملية التمثيل الضوئي تؤدي إلى زيادة إنتاج المادة الجافة بالنبات نتيجة امتصاص CO_2 ، بينما يعمل التنفس على هدم المواد الممثلة وتحرير CO_2 ، وهذا يؤدي إلى نقص المادة الجافة بالنبات.

٣- تعتبر كلا من عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس ضرورية للنبات، فعملية التمثيل الضوئي ضرورية لتثبيت CO_2 ، وانتاج الهكسوز، كما أن عملية التنفس ضرورية أيضا لتحويل الهكسوز إلى مكونات تركيبية (بنائية) ومواد خلوية نشطة، ومكونات مخزنة لازمة لنمو وتكشف النبات.

إن ما يهم المشتغلين بفسيولوجيا المحاصيل هو جعل كلا من عمليتي التمثيل الضوئي، والتنفس يعملان بأقصى كفاءة، فبالنسبة لعملية التمثيل الضوئي يجب العمل على استغلال الطاقة الضوئية الساقطة على النباتات بأقصى كفاءة، ما أمكن، وبالنسبة لعملية التنفس يجب العمل أيضا على استعمال هذه الطاقة التي تم تثبيتها في تكوين الناتج الاقتصادي للمحصول بأقصى كفاءة ممكنة.

جدول (٢-١). مقارنة بين عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس

وجه المقارنة	التمثيل الضوئي	التنفس
الفسفرة	**فسفرة ضوئية باستعمال الطاقة الضوئية**	**فسفرة تأكسدية باستعمال الطاقة الكيميائية**
اختزال النيوكليوتيد	**NADH المتكون بالطاقة الضوئية يستخدم لاختزال CO_2**	**NAD المتكون بأكسدة الكربون يستخدم لاختزال O_2**
ثاني أكسيد الكربون	**مادة تفاعل**	**منتج**
الماء	**مادة تفاعل**	**منتج**
الأكسجين	**منتج**	**مادة تفاعل**
مواد عضوية	**منتج**	**مادة تفاعل ومنتج**

تقدير معدل النمو الأعظم للمحصول

لقد أجري تقدير دقيق لأقصى أنتاج ممكن من المادة الجافة باستخدام الطاقة الشمسية كعامل محدد (لومس Loomis ووليامز Williams) كما هو مبين بجدول (٢-٢) ولقد كان متوسط الطاقة الشمسية الكلية خلال فترة زمنية طولها ١٠٠ يوم، حوالي ٥٠٠ كالوري/ سم^{٢}/ يوم. ولقد وضعت الإفتراضات التالية:

١- أن ٨٢% من الضوء المرئي قد تم الاستفادة منه بواسطة البلاستيدات الخضراء.

جدول (٢-٢). حساب القدرة الانتاجية اليومية بواسطة الكساء الخضري للمحصول.

البند	القيمة
١- الأشعة الشمسية الكلية	**٥٠٠ سعر (كالوري)/ سم^{٢}**
٢- الأشعة الشمسية المرئية (٤٠٠-٧٠٠ ملليميكرون)= ٤٤%	**٢٢٢ كالوري/ سم^{٢}**
٣- الكوانتا الكلية في المجال المرئي من الضوء (١٩.٥ ميكرو-أينشتين/ كالوري تقريبا)	**٤٣٢٠ ميكروأينشتين/ سم^{٢}**
أ- فقد عن طريق الانعكاس (٦-١٢% من الضوء المرئي)	**-٣٦٠ ميكروأينشتين/ سم^{٢}**
ب- فقد عن طريق الامتصاص الغير فعال =١٠% (مثل الجزء من الضوء الممتص في جدر الخلايا، وغيرها)	**-٤٣٢ ميكروأينشتين/ سم^{٢}**
٤- الكوانتا الكلية الممتصة من الضوء المرئي، والتي يستفاد منها في عملية التمثيل الضوئي	**٣٥٢٨ ميكروأينشتين/ سم^{٢}**
٥- كمية CO_2 المختزلة (١٠ كوانتا (فوتونات) / جزئ CO_2 مختزل)	**٣٥٣ ميكرومول CO_2 /سم^{٢}**
٦- الفقد في CO_2 عن طريق التنفس (٣٣%)	**-١١٦ ميكرومول CO_2 /سم^{٢}**
٧- صافي المنتج من CH_2O (١ CH_2O منتج/ CO_2 (مختزل))	**٢٣٧ ميكرومول CO_2 /سم^{٢}**
٨- تحول ميكرومولات/ سم^{٢} إلى جرام/م^{٢}	
أ- ٢٣٧ ميكرومول/ سم^{٢} = ٠.٠٠٠٢٣٧ مول/ سم^{٢}	**٢.٣٧ مول/ م^{٢}**
ب- CH_2O = ٣٠ جرام./ مول × ٢.٣٧ مول/ م^{٢}	**٧١ جم/ م^{٢}/ يوم**
٩- إذا كان CH_2O تكون ٩٢% من المادة الجافة، وأن المكونات الغير عضوية تكون ٨%، فإن المادة الجافة الكلية المتكونة = ٧١ جم/ م^{٢}/ يوم/ ٠.٩٢	**٧٧ جرام/ م^{٢}/ يوم**
٧٧ جم/م^{٢}/ يوم = ٣٤.٣٥ طن تتكون خلال موسم نمو طوله ١٠٠ يوم	

عن لومس ووليامز، ١٩٦٣.

الباب الثالث

كفاءة إعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية وإنتاج المادة الجافة في محاصيل الحقل

إن المحصول الكلي من المادة الجافة لنباتات محاصيل الحقل ينتج عن تجميع صافي معدل التمثيل الضوئي (صافي تمثيل غاز CO_2) أثناء موسم النمو. وأن العوامل الرئيسية المؤثرة على محصول المادة الجافة الكلية التي تكونها نباتات المحاصيل هي كفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه، وكفاءة الإستفادة من الطاقة الضوئية الممتصة في تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون.

ولقد سبق أن ناقشنا في الباب الثاني، تمثيل غاز ثاني أكسيد الكربون على مستوى الخلية والنسيج والنباتات الفردية، حيث قام علماء فسيولوجيا النباتات بدراسة تثبيت غاز CO_2 في تجارب متحكم فيها تحت ظروف المعمل، وفي هذا الفصل سوف نوضح الدراسات التي قام بها علماء فسيولوجيا المحاصيل على تثبيت غاز CO_2 على مستوى المجاميع النباتية النامية معا تحت ظروف الحقل. وهنا تجدر الإشارة إلى أن نمو نباتات محاصيل الحقل معا تحت ظروف الحقل يعمل على صعوبة دراسة تثبيت غاز CO_2 بواسطة الكساء الخضري لهذه النباتات تحت هذه الظروف، ويرجع ذلك إلى أن الظروف البيئية في الحقل غير ثابتة بل تتغير باستمرار، مثل التغيرات التي تحدث أثناء موسم النمو في شدة الإضاءة وطول الفترة الضوئية، ودرجة الحرارة ويسر الماء والعناصر الغذائية الموجودة في التربة، وتركيز الأكسجين وCO_2 . وسوف نوضح في هذا الفصل كفاءة اعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية الساقطة عليه، وعلاقة ذلك بإنتاجية المحصول المنزرع.

العوامل المؤثرة على كفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الشمسية

تؤثر كثير من العوامل الخاصة بالنبات على كفاءة الكساء الخضري لنباتات محاصيل الحقل، في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه وأهمها ما يلي:

١- مساحة السطح الورقي Leaf area ودليل مساحة الأوراق Leaf area index،
٢- زاوية الورقة على النبات (Leaf angle (Inclination.
٣- كثافة النباتات Plant density.
٤- توزيع النباتات بالحقل Plant distribution.

أولا- تأثير مساحة السطح الورقي ودليل مساحة الأوراق

١- تأثير مساحة السطح الورقي على كفاءة الكساء الخضري في اعتراض الأشعة الشمسية

لكي يستغل المحصول المنزرع الأشعة الشمسية الساقطة عليه بكفاءة عالية، فلابد وأن يعترض الكساء الخضري لهذا المحصول معظم الأشعة بواسطة الأنسجة الخضراء، والتي تقوم بعملية التمثيل الضوئي. وتعتبر الأوراق هي أعضاء النبات الرئيسية، والتي تقوم باعتراض الأشعة الشمسية وبالتمثيل الضوئي في نباتات محاصيل الحقل. وفي نباتات محاصيل الحقل الحولية مثل القمح والذرة، تكون مساحة السطح الورقي صغيرة في بداية حياة النبات وهي في طور البادرة، ولذلك فيعترض جزء قليل من الأشعة الشمسية الساقطة عليه، والجزء الأكبر يسقط على الأرض، ولذلك فإن أنواع المحاصيل ذات الكفاءة العالية في استغلال الطاقة الشمسية تعمل على استغلال طاقتها في المراحل الأولى من النمو في تكوين مساحة ورقية كبيرة، وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة كفاءة الإستفادة من الأشعة الشمسية الساقطة عليها في المراحل الأولى من نمو النبات، وهناك بعض العمليات الزراعية التي تشجع النمو المبكرللنباتات لتغطي سطح الأرض بسرعة للإستفادة من الضوء الساقط عليها، ومن هذه العمليات هي إضافة كمية من السماد عند الزراعة Starter fertilizer، وزيادة كثافة النباتات في وحدة المساحة.

إن إعتراض الأشعة الضوئية بواسطة الأوراق، يزداد بزيادة مساحة السطح الورقي، وأن معدل الزيادة في مساحة السطح الورقي تكون كبيرة في

بداية النمو، ولكن نظرا إلى أن مساحة السطح الورقي في تلك الفترة من النمو تكون صغيرة، فإنه لا يحدث إعتراض معنوي للأشعة الضوئية إلا بعد بضعة أسابيع من الزراعة. وحيث أن الإزهار يوقف الزيادة في مساحة السطح الورقي في النباتات الحولية محدودة النمو، والتي فيها يقف نمو الساق نتيجة لتحول البرعم الطرفي إلى نورة، مثل النباتات النجيلية (القمح والأرز والذرة وغيرها)، فإن الهدف من العمليات الزراعية التي تجرى لهذه المحاصيل هو الوصول إلى أقصى مساحة ورقية يمكنها إعتراض كل أو معظم الأشعة الشمسية الساقطة عند طرد النورات، وبالتالي إلى الوصول إلى أقصى تمثيل ضوئي بواسطة النباتات بعد طرد النورات، وهذا مهم بالنسبة لمحاصيل الحبوب، والتي تأتي فيها غالبية المواد الكربوهيدراتية التي تدخل في تكوين حبوبها من عمليات التمثيل الضوئي بعد طرد النورات، ولذلك فتصبح المساحة الورقية الفعالة لإنتاج المحصول عند طرد النورات.

طرق قياس السطح الورقي

يتم قياس السطح الورقي للنباتات بطرق متعددة، أهمها ما يلي:

١- استخدام البلانيميتر

تعتبر هذه الطريقة أهم الطرق التقليدية لقياس مساحة السطح الورقي لنباتات محاصيل الحقل. وتتم عملية القياس بهذه الطريقة عن طريق تسيير مؤشر الجهاز حول حافة الورقة، المراد قياس مساحتها حتى يصل إلى نقطة البداية من جديد، ثم تقرأ مساحة السطح الورقي على ورنية الجهاز، ويراعى عند إستخدام هذه الطريقة ما يلي:

أ- وضع الأوراق المراد قياس مساحة سطحها تحت لوح زجاجي قبل عملية القياس، حتى تتم عملية القياس بسهولة ودقة.

ب- قياس كل ورقة عادة على حدة، ويعاد قياسها أكثر من مرة لضمان الدقة.

٢- وزن وحدة المساحة من السطح الورقي

توزن الأوراق التي يراد قياس مساحة سطحها ويسجل وزنها، ثم توضع هذه الأوراق فوق بعضها، وباستخدام إسطوانة معلومة القطر، يتم أخذ ثلاث أقراص أو أكثر من أماكن مختلفة على الأوراق، ويتم وزن هذه الأقراص.

ويتم حساب مساحة هذه الأوراق عن طريق معرفة الوزن الكلي للأوراق ومساحة وزن الأقراص.

٣- توضع الأوراق المراد قياس مساحتها على أفراخ من الورق المصقول، ثم يحدد شكل الأوراق عليه بالقلم الرصاص، ثم تقص هذه الأوراق ويوزن الورق المصقول، الذي يشغل مساحة الأوراق المراد قياس مساحتها.

تحدد مساحة من الورق المصقول بالضبط ولتكن ١٠ × ١٠سم، ثم توزن بدقة.

تحسب مساحة الأوراق، عن طريق معرفة العلاقة بين وزن الورق المصقول الذي تم قصه، ووزن وحد المساحة من هذا الورق. وتتميز هذه الطريقة ببساطتها، ودقتها نسبيا.

٤- عدد المربعات المغطاة

تتميز هذه الطريقة بسهولة الإجراء والدقة نسبيا، ولكنها تحتاج إلى وقت طويل نسبيا، وتحسب مساحة الأوراق بهذه الطريقة عن طريق إستعمال لوح زجاجي مقسم إلى مربعات.

٥- استخدام جهاز Areameter

يتميز هذا الجهاز بسرعته، إذ يمكن عن طريقه قياس مساحة ٥٠٠ ورقة ذرة شامية في أقل من ساعة، ويعطي الجهاز المساحة حتى ثمانية أرقام صحيحة، ويعمل بكل من البطارية أو التيار الكهربي.

٦- استعمال المعادلات الرياضية

يمكن قياس مساحة السطح الورقي للنبات، بتطبيق المعادلات الرياضية، ولقد أمكن التوصل إلى معادلة رياضية، خاصة بتقدير مساحة السطح الورقي لكل محصول من محاصيل الحقل، وسوف نذكر فيما يلي المعادلات الرياضية التي تستخدم في تقدير مساحة السطح الورقي لبعض محاصيل الحقل:

عموما- قد أمكن التوصل إلى معادلات مشابهة، لتقدير مساحة السطح الورقي، لمعظم محاصيل الحقل.

جدول (٣-١). بعض المعادلات الرياضية المستعملة في تقدير مساحة السطح الورقي في بعض محاصيل الحقل

المحصول	مساحة السطح الورقي
الذرة الشامية	(طول الورقة × أقصى عرض) × ٠.٧٥ [١]
الذرة الرفيعة	(طول الورقة × أقصى عرض) × ٠.٧٤٧ [٢]
الأرز	(طول الورقة × عرضها) × ٠.٨٠٢ [٣]
القطن	(طول الورقة × عرضها) × ٠.٧٧ [٤]
القرطم	(طول الورقة × عرضها) [٥]
الفول	(طول الوريقة × عرضها) ٠.٥٨٣ + ٠.٦٢٤ [٦]
فول الصويا	(طول الوريقة الطرفية × عرضها) ٦.٥٣٢ + ٢.٠٤٥ [٧]

[1]Francis, *et. al.*(1969)
[2]Stickler, *et. al.*(1961)
[3]Bhan and Pande (1966)
[4]Ashley, *et. al.*(1963)
[5]Sepaskhah, (1977)
[6]Gardner, *et. al.*(1985)
[7]Wiersma andey (1975)

٢- تأثير دليل مساحة الأوراق على كفاءة الكساء الخضري في اعتراض الأشعة الشمسية

تحت ظروف الحقل لا تعتبر مساحة السطح الورقي مقياسا سليما لمساحة السطح الورقي لمحصول ما في مساحة معينة من الأرض التي يشغلها هذا المحصول، وذلك لأن مساحة السطح الورقي لكل نبات تكون مرتبطة ارتباطا وثيقا بمسافات الزراعة، أو المساحة التي يشغلها النبات، ولذلك فقد استعمل دليل مساحة الأوراق للتعبير عن كفاءة النبات في تغطية مساحة معينة من سطح الأرض، والذي يؤثر على اعتراض الأشعة الشمسية. ويعرف دليل مساحة الأوراق Leaf area index (LAI) بأنه عبارة عن النسبة بين مساحة الوراق التي يحملها النبات بالنسبة لمساحة الأرض التي يشغلها هذا النبات.

ويعتبر دليل مساحة الأوراق مقياسا ذو دلالة مورفولوجية، يعبر نسبة مساحة السطح الورقي (سطح واحد فقط) للنبات، إلى مساحة الأرض التي يشغلها النبات، أو بمعنى آخر على كفاءة النبات في تغطية مساحة معينة من سطح الأرض، والتي تؤثر بدورها على كفاءة التمثيل الضوئي، وإنتاج المادة الجافة بواسطة النبات، وعلى سبيل المثال، إذا فرض أن دليل مساحة الأوراق في الذرة الشامية ٤، فإن هذا يدل على أن كل ٤سم من مساحة الأوراق تغطي ١سم من سطح الأرض التي يشغلها النبات، ويحسب دليل مساحة الأوراق، في وقت معين، من المعادلة الآتية:

دليل مساحة الأوراق = مساحة السطح الورقي للنبات (سطح واحد فقط) / مساحة الأرض التي يشغلها النبات

$$LAI = \frac{\text{Leaf area } (L_A)}{\text{Ground area } (G_a)}$$

ويجب التعبير عن كل من مساحة السطح الورقي ومساحة الأرض بنفس وحدات قياس المساحة (م^{٢}/ م^{٢}).

ومن الناحية النظرية، فإن دليل مساحة الأوراق، الذي يساوي الواحد الصحيح، هو عبارة عن وحدة مساحة من السطح الورقي، لكل وحدة مساحة من سطح الأرض، ولذا فيمكن أن يعترض كل الأشعة الضوئية الساقطة عليها، لكن لا يحدث هذا عادة تحت الظروف الطبيعية بسبب شكل الورقة، وزاوية الورقة على الساق النباتات في هذه الحالة، وسمك الورقة، وهذا يؤدي إلى عدم إعتراض ١٠٠% من الضوء الساقط على النباتات في هذه الحالة. ولذلك فلكي يستطيع الكساء الخضري أن يعترض معظم الضوء الساقط عليه، فلابد أن يزيد دليل مساحة الأوراق عن الواحد الصحيح. ولقد وجد أن دليل مساحة أوراق يتراوح بين ٣-٥ يعتبر ضروريا للوصول إلى إعتراض معظم الضوء الساقط على الكساء الخضري، وكذلك أعلى إنتاج من المادة الجافة في معظم نباتات محاصيل الحقل، التي لا يكون فيها المجموع الخضري هو المحصول الإقتصادي الذي يزرع من أجله المحصول، بينما في محاصيل العلف الأخضر والتي يكون فيها المجموع الخضري هو الهدف من زراعة المحصول، فيجب أن يكون دليل مساحة الأوراق مرتفعا، للوصول بالكساء الخضري لهذه النباتات، إلى أقصى كفاءة في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه بعد فترة قصيرة من الزراعة، وعلى سبيل المثال، محاصيل العلف الأخضر وخصوصا النجيلية، ذات الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة، يلزم أن يكون دليل مساحة الأوراق عاليا (٨ -١٠) تحت الظروف المثلى، وأن قيم دليل مساحة الأوراق اللازمة لأقصى إنتاجية من المحصول المنزرع، تزداد بزيادة شدة الإضاءة. وأن دليل مساحة الأوراق وتوزيعة خلال موسم النمو، يختلف بإختلاف الأنواع النباتية، وتؤثر كثير من العمليات

الزراعية على دليل مساحة الأوراق، أهمها: كثافة النباتات (عدد النباتات في وحدة المساحة) والتسميد والري وميعاد الزراعة وغيرها.

علاقة دليل مساحة الأوراق (LAI) بمعدل نمو المحصول (CGR) وصافي التمثيل الضوئي (NAR)

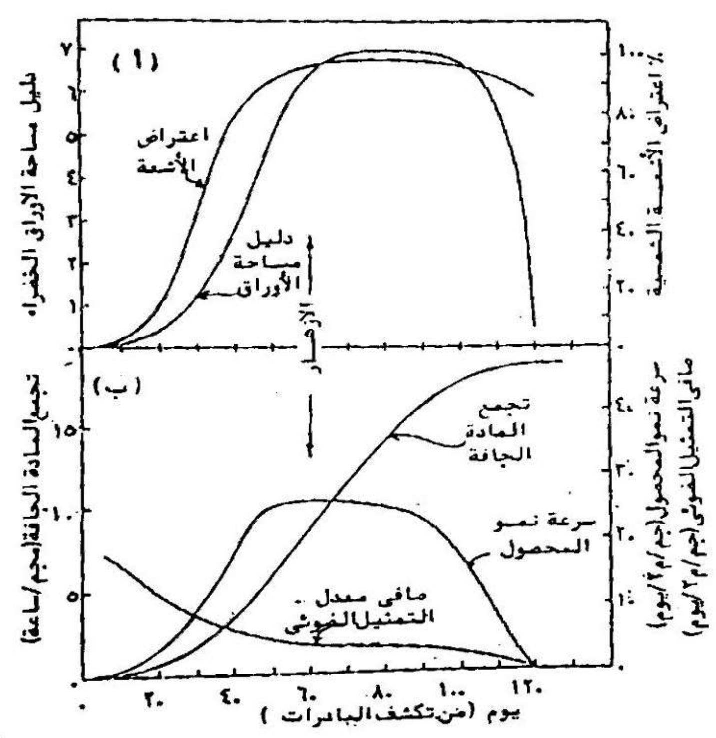
لقد وجد أن معدل نمو المحصول للأنواع النباتية المختلفة يرتبط إرتباطا وثيقا باعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية (شكل ٣-١).

ومن الجدير بالذكر أن NAR تكون عالية عندما تكون النباتات صغيرة، حيث تتعرض معظم الأوراق إلى ضوء الشمس المباشر. ومع نمو النباتات يزداد LAI ويزداد معه تظليل الأوراق بعضها لبعض مسببا نقصا في NAR بتقدم النباتات في العمر (شكل ٤-١). وعندما يكون LAI مرتفعا في الكساء الخضري للنباتات، فإن الأوراق حديثة العمر، الموجودة بقمة النباتات تعترض معظم الأشعة الشمسية الساقطة على الكساء الحضري، كما أن هذه الأوراق العليا تكون ذات معدل مرتفع لتمثيل غاز CO_2، وجزء كبير من ناتجات تمثيلها الضوئي تنتقل إلى الأجزاء الأخرى بالنبات، وعلى العكس من ذلك فإن الأوراق المسنة الموجودة بقاعدة النبات، والتي تعاني من التظليل يكون معدل تمثيلها لغاز CO_2 قليل، ولذلك فإنها تساهم بجزء أقل من المواد الغذائية الممثلة بها والتي تنتقل إلى الأجزاء الأخرى من النبات. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه عند حساب NAR لا يؤخذ في الحسبان الأجزاء الأخرى الممثلة ضوئيا عدا الأوراق مثل البتلات والسيقان وأغماد الأوراق والنورات، والتي يمكن أن تساهم مساهمة معنوية في محصول البذور في بعض النباتات.

وحيث أن NAR تعتبر مقياسا لمتوسط تمثيل CO_2 لكل وحدة مساحة من السطح الورقي من الكساء الخضري، فإنه عند ضرب NAR في LAI ينتج معدل نمو المحصول CGR كالآتي:

معدل نمو المحصول = صافي معدل التمثيل الضوئي × دليل مساحة الأوراق

$$CGR = NAR \times LAI$$



شكل (٣-١). علاقة دليل مساحة الأوراق باعتراض الأشعة الشمسية الساقطة على الكساء الخضري ومعدل نمو المحصول وانتاج المادة الجافة أثناء فصل نمو نبات من نباتات محاصيل الحبوب محدود النمو. (Gardner, *et.al.* 1985).

دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل

إن معدل نمو المحصول يزداد بزيادة دليل مساحة الأوراق حتى يصل دليل مساحة الأوراق إلى قيمة عندها يعترض الكساء الخضري للمحصول ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه، كما يصل معدل نمو المحصول إلى أقصى قيمة له أيضا. ويطلق على دليل مساحة الأوراق عند هذه النقطة بـ:

١) **دليل مساحة الأوراق الحرج** Critical leaf area index إذا لم يحدث نقص أو حدثت زيادة غير معنوية في معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك، أو،

٢) **دليل مساحة الأوراق الأمثل** Optimum leaf area index إذا انخفض معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك.

ولتوضيح دليل مساحة الأوراق الحرج، فقد قام Brougham عام١٩٥٦م، بإجراء تجربة على حشيشة الراي والبرسيم، ووجد أنه بتقدم النباتات في العمر

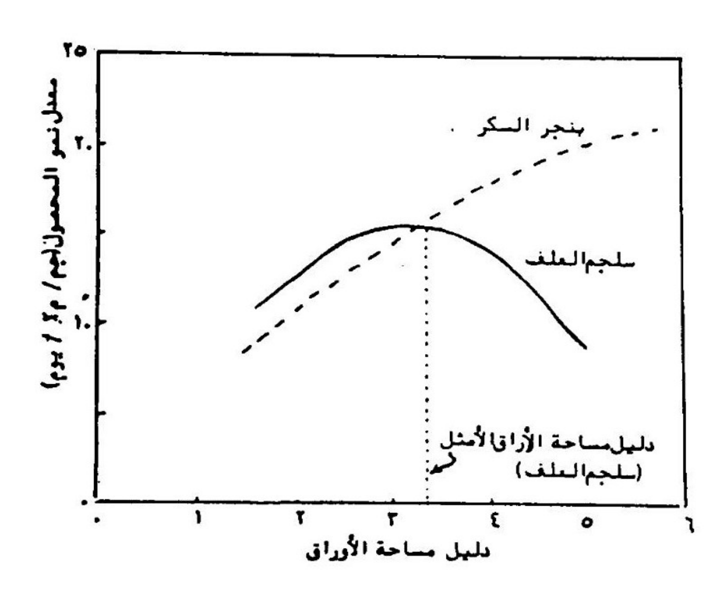
يزداد LAI، كما يزداد أيضا اعتراض الكساء الخضري للأشعة الضوئية الساقطة عليه حتى وصل دليل مساحة الأوراق إلى ٥، وعندها اعترض الكساء الخضري للنباتات ٩٥% من الأشعة الشمسية الساقطة عليه، وبزيادة دليل مساحة الأوراق عن ٥، حدثت زيادة غير معنوية في سرعة نمو المحصول، ولذلك فقد أطلق على دليل مساحة الأوراق هذا بـ"دليل مساحة الأوراق الحرج".

ولقد أجرى واتسون Watson عام ١٩٥٨م، في إنجلترا، تجربة مثل التي أجراهابروغام بهدف توضيح دليل مساحة الأوراق الأمثل، وفي هذه التجربة قام واتسون بزراعة كل من سلجم العلف، وبنجر السكر كل على انفراد، على خطوط، وقام بزراعة عدد نباتات مختلف في كل خط، لكي يغير من دليل مساحة الأوراق. وقام بقياس معدل نمو المحصول للنباتات كل ١٠ يوم، ولقد وجد واتسون نتائج مشابهة لتلك التي وجدها بروغام، فيما عدا أن معدل نمو المحصول في سلجم العلف فقط قد وصل إلى أعلى قيمة له عند دليل مساحة أوراق قدره ٣.٥، ثم انخفض بعد ذلك بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك، ولذلك فقد أطلق على دليل مساحة الأوراق هذا (٣.٥) بـ"دليل مساحة الأوراق الأمثل" بينما في نباتات بنجر السكر لم ينخفض معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن قيمتها المثلى، ولذلك فتعتبر نباتات بنجر السكر أكثر كفاءة من سلجم العلف، إذ لم تصل النباتات إلى أقصى CGR حتى عند LAI قدره ٥، ويبين شكل (٣-٢) علاقة معدل نمو المحصول بدليل مساحة الأوراق في نباتات سلجم العلف Kale وبنجر السكر.

ويرجع السبب في أن بعض النباتات لها دليل مساحة أوراق أمثل، إلى أن عملية التمثيل الضوئي للكساء الخضري تزداد بزيادة LAI حتى يتم اعتراض ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه بواسطة الأجزاء الممثلة ضوئيا، وأن أي زيادة إضافية أخرى في مساحة السطح الورقي في مثل هذه النباتات نتيجة لإستمرار النمو الذي يحدث بعد الإزهار وتكوين أوراقا جديدة عند قاعدة النبات، سوف تعمل فقط على تظليل الأوراق السفلى الحديثة التكوين والتي تصبح بعد ذلك غير قادرة على إنتاج ناتجات تمثيل ضوي تكفي إحتياجات تنفسها ونموها، ولذلك فتستمد إحتياجاتها من ناتجات التمثيل الضوئي اللازمة لنموها من أوراق أخرى مجاورة لها، أي أن هذه الأوراق المظللة قد تصبح متطفلة Parasitic وهذا يؤدي إلى نقص معدل النمو، ولذلك فيظهر دليل مساحة أوراق أمثل لمثل هذه النباتات (شكل ٤-٢).

ويظهر دليل مساحة الأوراق الحرج في الأنواع النباتية التي تكون أوراقا جديدة في قمة النبات، والأوراق السفلى المسنة الموجودة عند قاعدة النبات تصبح مظللة، وأن الأوراق تامة الإنبساط لا تستمد ناتجات تمثيل ضوئي من أوراق أخرى، وبالإضافة إلى ذلك، فبمجرد أن تصبح الأوراق السفلى مظللة، فإن معدل تنفسها يقل، نتيجة لنقص معدل تمثيلها الضوئي (Duncan, *et. al.* 1967). ولا يحدث نقصا في معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق، ولذلك فتظهر مثل هذه النباتات دليل مساحة أوراق حرج، وفي هذا المجال وجد كنج وايفانز عام ١٩٦٧م، أن الزيادة في معدل تنفس الأوراق السفلى المسنة، يقل بدرجة كبيرة، بمجرد الوصول إلى دليل مساحة الأوراق الحرج في نباتات القمح والبرسيم الحجازي.

مما سبق يتضح أنه على الرغم من أن دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل يختلفان في التعريف إلا أن كلا منهما عبارة عن دليل مساحة الأوراق الذي يحقق أعلى معدل نمو للمحصول CGR، وأن الكساء الخضري عند كل من دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل يعترض معظم الأشعة الضوئية الساقطة عليه.



شكل (٣-٢).علاقة معدل نمو المحصول بدليل مساحة الأوراق في نباتات سلحم العلف وبنجر السكر. لاحظ أن نباتات سلجم العلف تظهر دليل مساحة أوراق أمثل (واتسون، ١٩٥٨).

إعتراض الأشعة الشمسية أثناء نفاذها خلال الكساء الخضري للمحصول

إن الأشعة الضوئية الساقطة على الكساء الخضري، جزء منها ينفذ إلى سطح الأرض خلال الفراغات الموجودة داخل الكساء الخضري، ويعترض الكساء الخضري الجزء الباقي. وأن جزءا من الأشعة الضوئية التي يعترضها الكساء الخضري يمتص بواسطة الأوراق، وجزء منها ينفذ خلال الأوراق وجزءا ينعكس ثانية (شكل ٤-٧). وأن كلا من الأشعة الضوئية النافذة والمنعكسة من الأوراق تتعرض إلى إنعكاسات ونفاذا متتاليا في طبقات الكساء الخضري، ولذلك فإن الأوراق العليا على الكساء الخضري تعترض كلا من الأشعة المباشرة والأشعة الغير مباشرة (النافذة)، بينما الأوراق السفلى على الكساء الخضري تعترض جزءا صغيرا من الأشعة المباشرة (النافذة خلال الفراغات الموجودة بالكساء الخضري)، وجزءا كبيرا من الأشعة الغير مباشرة (النافذة من الأوراق، والمنعكسة من سطح النبات وسطح التربة). وعموما- تتغير كلا من كمية ونوع الأشعة الضوئية بتغير العمق في الكساء الخضري، وحيث أن النباتات تمتص الأشعة المرئية ذات موجات ضوئية طولها يقع في المجال بين ٤٠٠-٧٠٠ نانوميتر، فإن الأشعة ذات طول الموجة الأطول من ٧٠٠ نانوميتر تصبح أكثر سيادة كلما تعمقنا في الكساء الخضري تجاه سطح الأرض. ولهذا فإن الأشعة الضوئية التي يجب أن تقاس داخل الكساء الخضري لنباتات المحاصيل تحت ظروف الحقل هي الأشعة ذات أطوال موجات من ٤٠٠-٧٠٠ نانوميتر، ويعتبر هذا مقياسا للأشعة الضوئية (الطاقة الإشعاعية) الفعالة في التمثيل الضوئي، ويطلق على هذه الأشعة Photosynthetically active radiation (PAR).

إن معامل إنقراض الكساء الخضري Extinction coefficient يعبر عن درجة إنقراض (إضمحلال) الأشعة الضوئية أثناء نفاذها خلال الكساء الخضري للمحصول، ويحسب كالآتي:

$$K = \frac{-\log_e \frac{I_i}{I_o}}{LAI}$$

حيث أن:

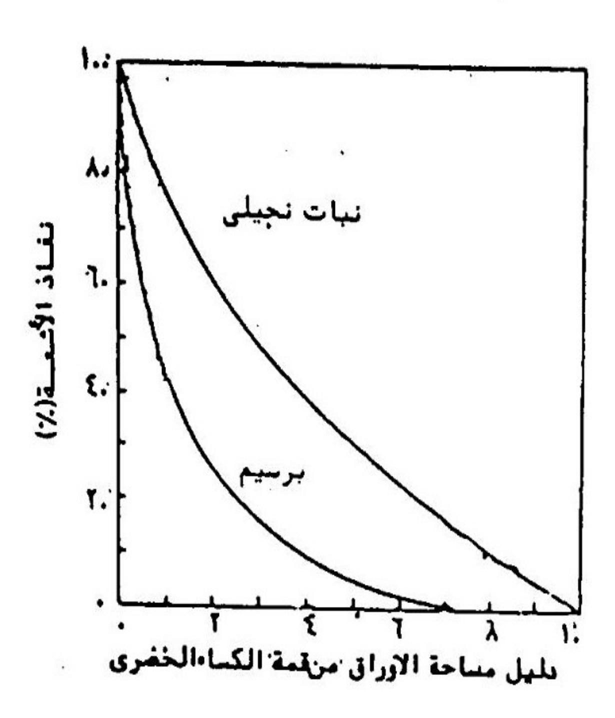
I_0 = الأشعة الضوئية المستعملة في التمثيل الضوئي والساقطة على قمة الكساء الخضري للنباتات،

I_1 = الأشعة الضوئية المستعملة في التمثيل الضوئي أسفل طبقة من الأوراق في الكساء الخضري،
LAI = دليل مساحة السطح الورقي عند هذه الطبقة من الأوراق،
K = معامل إنقراض الكساء الخضري للمحصول
e = أساس اللوغاريتم الطبيعي (٢.٧١٨٢٨).
Log_e = لوغاريتم ناباريان = ٢.٣٠٣ × لو$_{١٠}$

ومن هذه المعادلة يتضح أنه إذا كانت نفاذية الضوء داخل الكساء الخضري عالية، أي إذا كانت نسبة الإضاءة التي تعترضها وتمتصها الأوراق بوحدة الإرتفاعات بالكساء الخضري منخفضة، فإن معامل إنقراض المحصول يكون منخفضا، والعكس صحيحا.

ويتضح من المعادلة السابقة أيضا أن معامل إنقراض الكساء الخضري لمحصول ما يتأثر بدليل مساحة الأوراق على النبات في الكساء الخضري. ويتضح من جدول (٣-١) أن قيمة معامل الإنقراض تزداد بزيادة دليل مساحة الأوراق، وأن شدة الإضاءة تكون أقل فعالية عند دليل مساحة الأوراق المنخفض، وأن دليل مساحة الأوراق الأمثل يزداد بزيادة شدة الإضاءة الساقطة على النباتات.

كما يتأثر معامل إنقراض الكساء الخضري للمحصول بوضع الأوراق على النباتات في الكساء الخضري للمحصول. وأن وضع الأوراق في الكساء الخضري يشمل أساسا زاوية الورقة، والطريقة التي تتجمع بها الأوراق في الكساء الخضري.



شكل (٣-٣). علاقة دليل مساحة الأوراق بانقراض الأشعة الشمسية خلال الكساء الخضري للبرسيم ونبات نجيلي. (Stern and Donald, 1962).

ثانيا- تأثير زاوية الورقة على الساق على اعتراض الأشعة الشمسية

يقسم الكساء الخضري للمحاصيل المختلفة إلى أربعة أنماط وذلك على حسب زاوية الورقة على الساق كالآتي:

١- كساء مائل إلى الإستواء (الأفقي) Planophile: وفيه تكون معظم الأوراق أفقية (مستوية) Horizontal، وفيه تكون زاوية الورقة على الساق أقل من ٣٥ درجة من المستوى الأفقي.

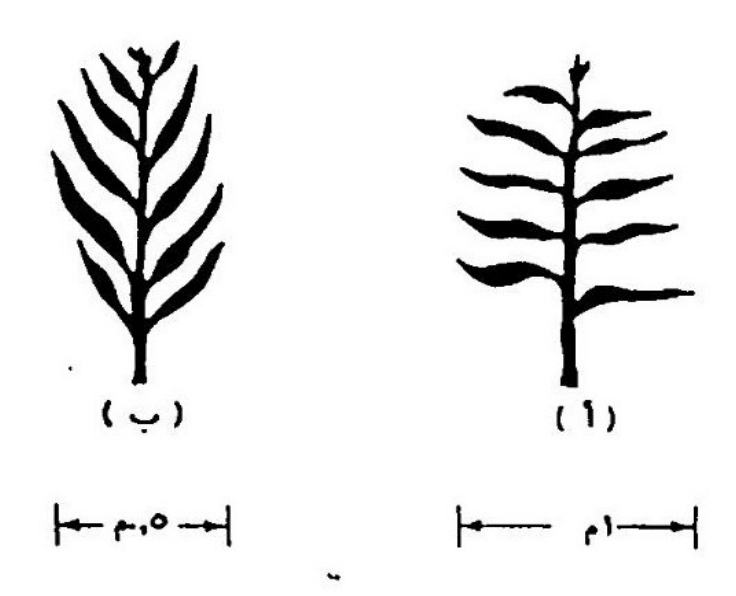
٢- كساء مائل للإنتصاب (قائم) Erectophile: وفيه تكون معظم الأوراق تقريبا قائمة وتكون زاوية الورقة على الساق أكبر من ٦٥° من السطح الأفقي.

٣- كساء مائل للإنحراف Plogrophile : وفيه تكون الأوراق على الساق مائلة للإنحراف.

٤- كساء مائل للخلط Extremophile: وفيه تتكرر الأوراق الأفقية والقائمة على الساق.

وتؤثر زاوية الورقة على كفاءة إعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية الساقطة عليه، إذ وجد أن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية في نباتات البرسيم يحتاج إلى مساحة ورقية أقل لإعتراض معظم الأشعة الشمسية الساقطة، بالمقارنة بالكساء الخضري لنبات نجيلي ذو أوراق قائمة كما هو مبين بشكل (٣-٣)، ولقد وجد أن معامل إنقراض الكساء الخضري لنباتات البرسيم يساوي ٠,٦ تقريبا ولنباتات العشب النجيلي هي ٠,٢٥ (Loomis and Williams, 1969)، ومن الشكل يتضح أن الكساء الخضري للبرسيم يعترض ٩٥% من الأشعة الشمسية الساقطة عليه عند دليل مساحة أوراق قدره ٥، ويعبر عنه بدليل مساحة الأوراق الحرج للبرسيم، بينما في النبات النجيلي فقد استمر معدل نمو المحصول في الزيادة حتى دليل مساحة أوراق حرج قدره ٩.

ولقد كان في الماضي ينتخب للنباتات ذات الأوراق الأفقية، وذلك لأن في مثل هذه النباتات تكون أكثر مقاومة للحشائش الضارة النامية معها، وتحد من نموها وتقضي على الكثير منها. ولكن الأصناف ذات الأوراق الأفقية تحتاج إلى مساحة أكبر من مثيلتها ذات الأوراق القائمة وبالتالي يكون عدد النباتات في وحدة المساحة أقل في حالة النباتات ذات الأوراق الأفقية، مما يؤثر على كمية المحصول في وحدة المساحة. ويبين شكل (٣-٤) طرازين من النباتات، أحدهما ذو أوراق أفقية والآخر ذو أوراق قائمة.

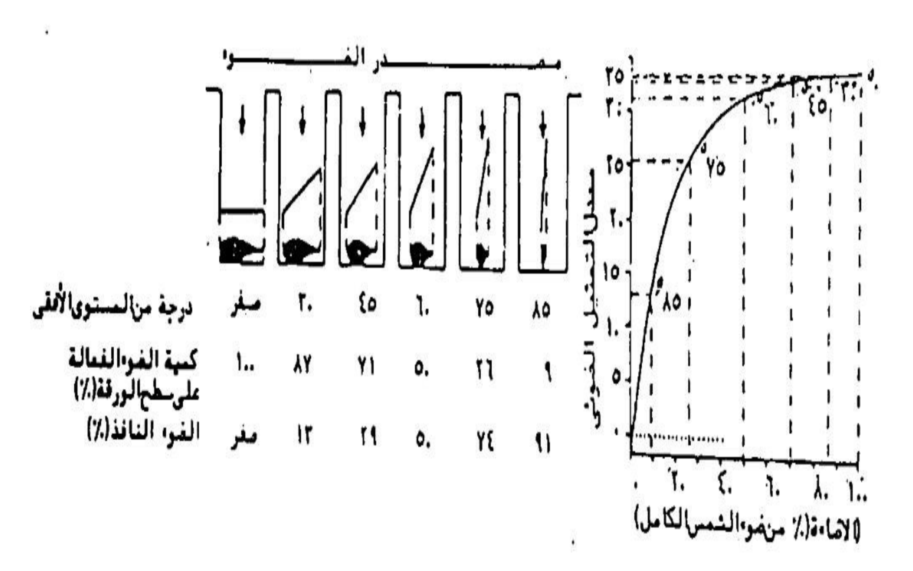


شكل (٣-٤). طرازين مختلفين من النباتات: أ) نبات ذو أوراق أفقية، ب) نبات ذو أوراق قائمة. يلاحظ أن النبات ذو الأوراق الأفقية يشغل مساحة من الأرض أكبر مما يشغلها النبات ذو الأوراق القائمة (Stokopf, 1981).

العلاقة بين زاوية الورقة وكفاءة التمثيل الضوئي وانقراض الأشعة الضوئية خلال الكساء الخضري ومعدل نمو المحصول

في ضوء الشمس المباشر تكون معظم الأوراق الفردية مشبعة ضوئيا (شكل ٤-٥). وفي الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، فإن الأوراق العليا تكون مشبعة ضوئيا، بينما تكون الأوراق السفلى ذات معدل تمثيل ضوئي منخفض نتيجة للتظليل.

ومن الناحية النظرية، يمكن أن تزداد كفاءة التمثيل الضوئي للكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، عندما يكون توزيع الأشعة الشمسية على أسطح الأوراق متماثلا، ولكن مثل هذا التوزيع المتساوي لا يتم إلا إذا احتوى مثل هذا الكساء الخضري على أوراق قائمة (على الأقل الأوراق العليا) عندما تكون الشمس عمودية.



شكل (٣-٥). العلاقة بين زاوية الورقة، والأشعة الشمسية عند سطح الورقة ومنحنى الإستجابة للضوء في ورقة نبات برسيم أحمر. (Gardner, *et.al.* 1985).

إن شكل (٣-٥) يوضح الفكرة النظرية لإمكانية زيادة كفاءة التمثيل الضوئي للكساء الخضري عن طريق توجيه الأوراق ناحية الوضع القائم. وعلى سبيل المثال، عندما تكون زاوية الورقة ٧٥ درجة من المستوى الأفقي، وأسقط عليها من مصدر ضوئي أشعة عمودية، فإن الأوراق تعترض ٢٦٪ فقط من هذه الأشعة بالمقارنة بالأوراق الأفقية، وأن كمية الأشعة الضوئية الفعالة على هذه الورقة يكون أيضا ٢٦٪ بالمقارنة بمثيلتها على الأوراق الأفقية، وأن كفاءة الأشعة الضوئية تكون أعلى في كثافة ضوئية منخفضة نسبيا ، وأن الأوراق القائمة تكون أكثر فعالية أو كفاءة لكل وحدة من الضوء الذي تعترضه وفي شكل (٣-٥) عندما تكون زاوية الورقة ٧٥ درجة من السطح الأفقي، وتعترض ٢٦٪ فقط من الضوء الساقط، فإن التمثيل الضوئي للورقة ينخفض بمقدار ٢١٪ فقط من التمثيل الضوئي للأوراق ذات الوضع الأفقي. وأن هذا النقص القليل في معدل التمثيل الضوئي للأوراق العليا بسبب وضعها الرأسي (القائم)، يسمح بكمية أكبر من الأشعة الضوئية أن تنفذ إلى الأوراق السفلى، ولذلك فإنه من الناحية النظرية، يمكن زيادة معدل التمثيل الضوئي وسرعة نمو المحصول زيادة كبيرة عن طريق توجيه الأوراق وحفظها قائمة عندما يكون دليل مساحة الأوراق كبيرا كما هو مبين بجدول

(٣-٢). ويتضح من الجدول أن أعلى تمثيل ضوئي للكساء الخضري في مساحة معينة من الأرض، أمكن التوصل إليه عندما كانت زاوية الأوراق على النبات ٨٥ درجة.

جدول (٣-٢). العلاقة بين زاوية الورقة، والتمثيل الضوئي، ودليل مساحة الأوراق (LAI)، والتمثيل الضوئي الكلي للكساء الخضري (محسوبة من بيانات شكل ٤-٥).

زاوية الورقة من المستوى الأفقي	التمثيل الضوئي للورقة (مجم/ ك أ٢/ دم٢/ ساعة)	LAI اللازم لاعتراض معظم الضوء الساقط	التمثيل الضوئي الكلي للكساء الخضري في مساحة من الأرض (مجم/ ك أ٢/ دم٢ من الأرض/ ساعة)
صفر	٣٣	١	٣٣
٦٠	٣١	٢	٦٢
٧٥	٢٦	٤	١٠٤
٨٥	١٢	١٠	١٢٠

وفي هذا المجال وجد دانكن عام ١٩٧١ أنه بالنسبة لنباتات الذرة الشامية المنزرعة في الولايات المتحدة في منطقة حزام الذرة الشامية أن النباتات الأكثر إنتاجية، تكون زاوية أوراقها مساوية ٨٠ درجة من المستوى الأفقي.

جدول (٣-٣). تأثير زاوية الورقة على كمية محصول الحبوب ونسبة النباتات الخالية من الكيزان (الدكر) في الذرة الشامية.

	المحصول (كجم/ هكتار	**% النباتات الدكر**
نباتات ذات أوراق طبيعية	**٦٢٠٢أ**	**٢٨أ**
نباتات ذات أوراق قائمة	**٨٧٦٩ب**	**١٤ب**
توجيه الأوراق يدويا في الصنف بيونير ٣٣٠٦		
أوراق تركت كما هي بدون معاملة	**١٠٦٨٣جـ**	**٤جـ**
كل الأوراق حفظت في الإتجاه القائم	**١١٣٨٦جـ د**	**٦ب جـ**
كل الأوراق الموجودة فوق الكوز حفظت في الإتجاه القائم	**١٢٢٠٢د**	**٣جـ**

عن بندليتون، وآخرون، عام ١٩٦٨م.

*المتوسطات المتبوعة بنفس الحرف لا تختلف معنويا عند مستوى ٥%.

التباين في زاوية الورقة داخل الكساء الخضري

قد تختلف زاوية الورقة على النبات في الطبقات المختلفة في الكساء الخضري. ويبين شكل (٣-٨) نبات ذو أوراقا قائمة في الجزء العلوي منه، وتصبح تدريجيا أفقية في الجزء السفلي منه، ويطلق على مثل هذا الكساء الخضري بـ"الشكل المثالي للكساء الخضري Idial foliage display" (Trenbath and Angus, 1975).

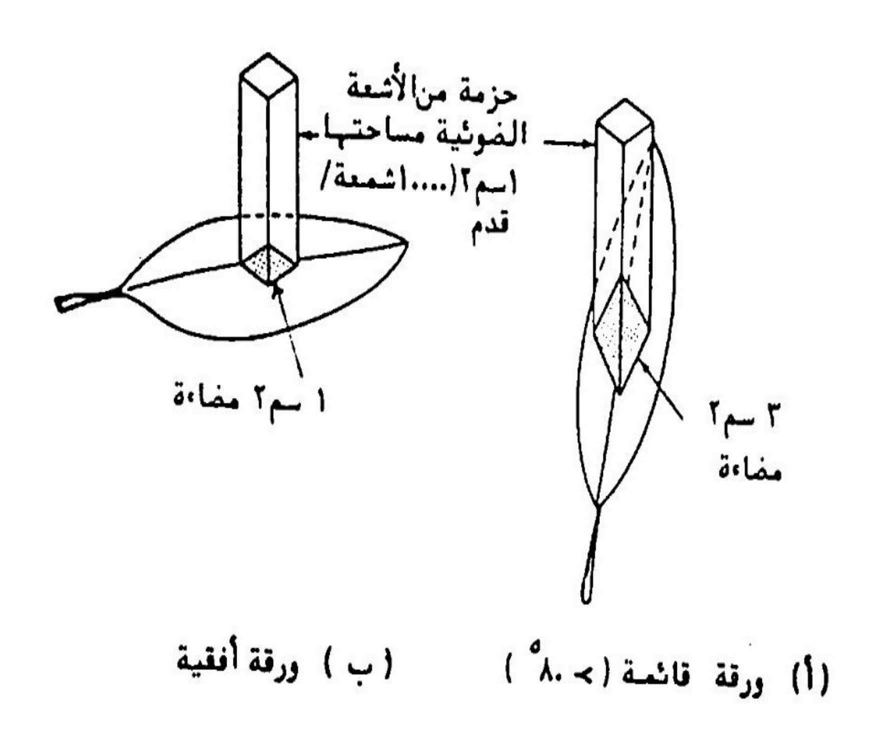
ولقد وجد بندليتون وآخرون، عام ١٩٦٨، أن الكساء الخضري لنباتات الذرة الشامية الذي حفظت فيه كل الأوراق الموجودة فوق الكوز في وضع قائم، قد أعطت محصولا أعلى من كل من النباتات التي تركت أوراقها طبيعية، وأيضا من النباتات التي حفظت كل أوراقها في الوضع القائم (جدول ٤-٣). ويمكن تفسير ذلك على أساس أن نظام حفظ الأوراق العليا على النبات في الوضع القائم، ووجود الأوراق السفلى في الوضع الأفقي يسمح للأوراق القائمة في ظروف الإضاءة العالية بأن تعترض كمية أقل من الأشعة الشمسية الساقطة كافية للوصول بالأوراق إلى أعلى معدل تمثيل ضوئي، وفي نفس الوقت تسمح بنفاذ كمية كبيرة من الأشعة الشمسية إلى الأوراق السفلى.

مزايا وعيوب الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة

١- يتميز الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة بأنه ذو قدرة أكبر على اعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه (شكل ٤-٦). كما أن زاوية الورقة تؤثر على توزيع وانتشار وشدة الضوء داخل الكساء الخضري، وعلى سبيل المثال، يستقبل سطح الورقة وقت الظهيرة في يوم مشمس، إضاءة شدتها ١٠٠٠٠-١٢٠٠٠ شمعة/ قدم، وأن معظم الأنواع النباتية لا تستطيع الإستفادةمن هذه الكثافة الضوئية العالية، إذ أن أقصى تمثيل ضوئي لكثير من النباتات يتم عند تشبع ضوئي بين ٢٠٠٠-٣٠٠٠ شمعة/ قدم. ولقد وجد أن انتشار الضوء الساقط على الكساء الخضري على مساحة ورقية أكبر، يؤدي إلى نقص شدته. ولتوضيح ذلك، تصور أن هناك حزمة من الأشعة الشمسية شدتها ١٠٠٠٠ شمعة/ قدم، ساقطة على ورقة أفقية (شكل ٤-٦)، ثم افترض أن الورقة مالت تدريجيا، لاحظ أن مقدار المساحة من سطح الورقة التي تسقط عليها هذه الأشعة تزداد تدريجيا، وعلى العكس من ذلك، تقل شدة الإضاءة على هذه المساحة من سطح الورقة تدريجيا أيضا. وبوجه عام، يمكن القول بأن زاوية الورقة المساوية لـ ٨٠ درجة من المستوى الأفقي تعتبر الوضع الأمثل

للورقة في الكساء الخضري للنباتات للإستفادة من الإضاءة الساقطة عليه كما سبق أن ذكرنا.

٢- يتميز الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة بأن الجزء المنعكس من الضوء بواسطة الأوراق القائمة، ينعكس داخل الكساء الخضري للنباتات، حيث تستفيد منه الأوراق السفلى على النباتات أو النباتات المجاورة، وعلى العكس من ذلك، فإن الأوراق الأفقية تعكس جزءا من الضوء في الجو المحيط بالنباتات، حيث لا تستفيد منه النباتات، كما هو مبين بشكل (٣-٧).



شكل (٣-٦). حزمة أشعة ضوئية عمودية ساقطة على: أ) ورقة قائمة، ب) ورقة أفقية. (عن Stoskopf عام ١٩٨١).

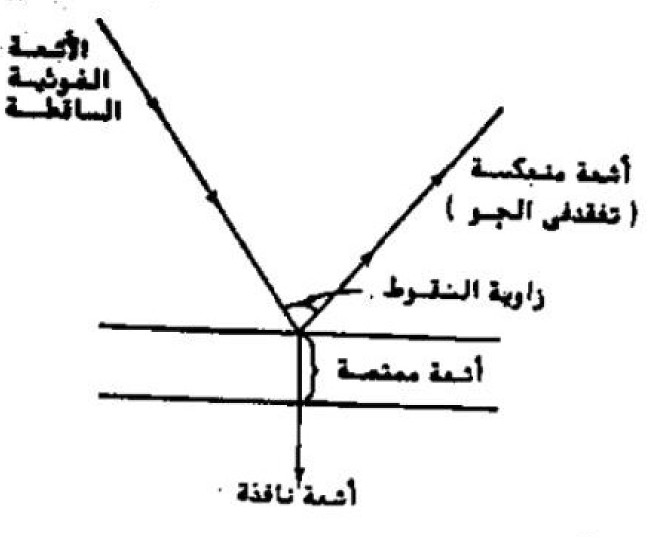
٣- تتميز الأوراق القائمة أيضا بأنها تسمح للضوء بالنفاذ إلى الأوراق السفلى من النبات كما سبق أن ذكرنا. ولقد وجد أن دليل مساحة الأوراق الحرج والذي عنده يتم إعتراض ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه يكون منخفضا في حالة الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، وعاليا في الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة. ولقد وجد أن الكساء الخضري ذو

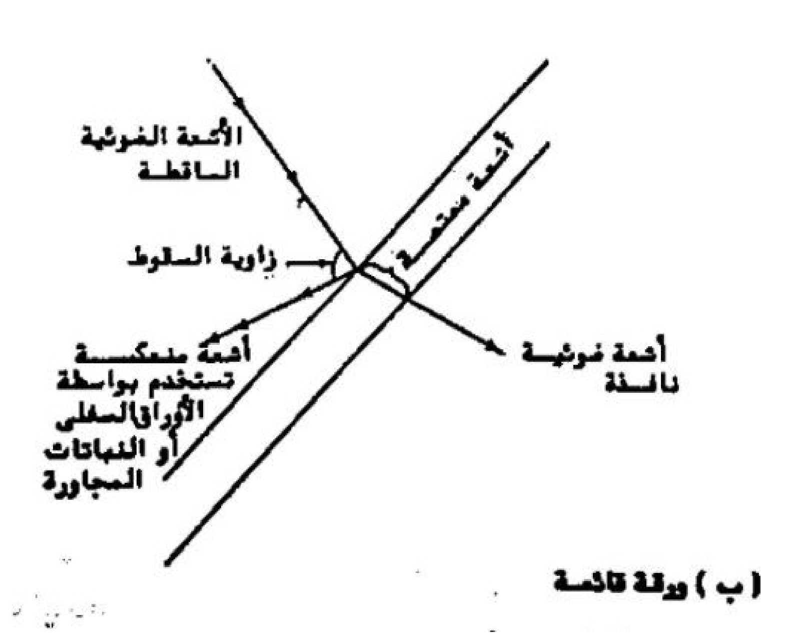
الوراق الأفقية يعطي أعلى CGR عند دليل مساحة أوراق أقل من ٣، بينما يحتاج الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة إلى دليل مساحة أوراق قدره ٤ أو أكثر للوصول إلى أعلى CGR، وهنا تجدر الإشارة، إلى أنه عند دليل مساحة الأوراق المنخفض، تقل درجة تظليل الأوراق بعضها لبعض، ولذلك فإن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية يكون أفضل نسبيا في هذه الحالة من مثيله ذو الأوراق القائمة، وعلى العكس من ذلك، عند دليل مساحة الأوراق المرتفع، فإن الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة، يتميز عن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية في أن الضوء يكون فيه موزعا توزيعا متماثلا على السطح الورقي كما أن الأوراق العليا تعترض كمية أقل من الضوء الساقط عليها، وهذا يسمح بنفاذ كمية أكبر من الضوء إلى الأوراق السفلى على النبات، بعكس الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية.

ولقد وجد Angus و Trenbath عام ١٩٧٥م، أن معدل نمو المحصول في الطرز ذات الأوراق القائمة في نباتات بنجر السكر، والشعير والأرز كانت أعلى بنسبة تراوحت بين ١٩-١٠٨% عن معدل نمو المحصول في الطرز ذات الأوراق الأفقية لهذه المحاصيل.

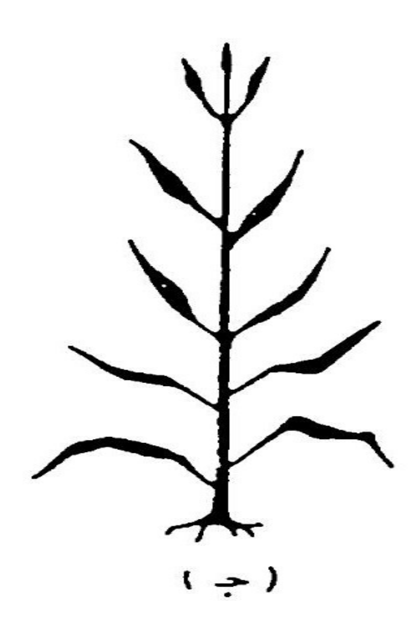
عموما- تعتبر زاوية الورقة أحد العوامل الرئيسية المسؤلة عن التباين بين الأصناف عالية المحصول وتلك المنخفضة المحصول في كثير من المحاصيل ومنها الشعير (Gardner, *et.al.* 1964)، وأن الأصناف عالية المحصول تتميز بالأوراق القائمة الرفيعة، أما الأصناف المنخفضة المحصول تكون ذات أوراق عريضة متهدلة. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الأوراق القائمة تكون ذات تأثير وفاعلية أكبر على زيادة المحصول عندما يكون دليل مساحة الأوراق عاليا (Duncan, 1971) وهذا يتطلب زراعة مثل هذه الطرز ذات الأوراق القائمة بكثافة نباتية تحقق أو تزيد عن دليل مساحة الأوراق الحرج.

وفي دراسة أجراها دانكن (١٩٧١م) وجد أن أعلى معدلات تمثيل ضوئي يمكن التوصل إليها في النباتات التي تحتوي على أوراق قائمة في الجزء العلوي منها، وأوراق أفقية في الجزء السفلي منها كما هو مبين بشكل (٣-٨).





شكل (٣-٧). نموزج مبسط، يوضح مصير الأشعة الضوئية الساقطة على سطح، أ) ورقة أفقية، ب) ورقة قائمة، (عن Stoskopf، عام ١٩٨١).



شكل (٣-٨). الشكل المثالي للنبات. يلاحظ أن الأوراق العليا قائمة، والسفلى أفقية. (Stoskopf, 1981).

يتضح مما سبق أنه يمكن الجصول على محصول مرتفع من بعض أنواع المحاصيل المنزرعة عن طريق زراعة الأصناف ذات الأوراق القائمة منها، وهذا هام بالنسبة لمنتج المحصول، ولكن على الرغم من ذلك فإن التربية للطرز القائمة لم تحقق حتى الآن نجاحا كبيرا في معظم المحاصيل، وذلك لأسباب متعددة، أهمها هو تأثير الوضع القائم للورقة على النبات ببعض الظروف البيئية، مثل الرطوبة، والتسميد الأزوتي. إذ يؤدي تعرض النباتات للجفاف إلى نقص إمتلاء خلايا الورقة، وهذا يؤدي إلى تهدلها. كما تصبح الأوراق متهدلة أيضا في بعض النباتات، تحت ظروف التسميد الأزوتي المرتفع، وتصبح أفقية. وعلاوة على ذلك، فقد يكون الإنتخاب لصفة الأوراق القائمة على حساب صفات أخرى مهمة.

ثالثاً- تأثير كثافة النباتات على اعتراض الأشعة الشمسية

إن فعالية إعتراض الطاقة الشمسية الساقطة على الكساء الخضري للمحصول تحتاج إلى مساحة ورقية مناسبة، وموزعة بإنتظام، وتغطي سطح الأرض، وهذا يمكن الوصول إليه عن طريق زراعة الكثافة المثلى أي زراعة العدد الأمثل من النباتات في وحدة المساحة من الأرض مع إنتظام توزيعه.

العوامل التي تؤثر على الكثافة المثلى للنباتات

أ) عوامل خاصة بالنبات وأهمها حجم النبات والتفريع والرقاد،

ب)عوامل بيئية ومنها الإضاءة والرطوبة الأرضية وخصوبة التربة والتسميد.

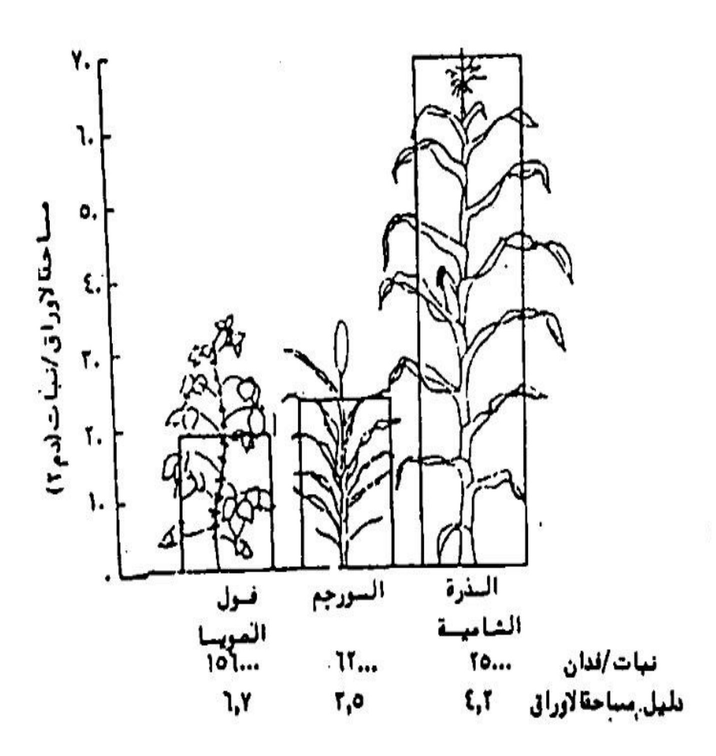
أ- العوامل الخاصة بالنبات

١- حجم النبات Plant size

تختلف نباتات أنواع المحاصيل المختلفة وكذلك الأصنف المختلفة داخل النوع الواحد، عن بعضها في حجم الكساء الخضري، وأن حجم النبات يدل أساسا على مساحة الأوراق لكل نبات. والمثال على ذلك، أن دليل مساحة أوراق نباتات الذرة الشامية، والذرة الرفيعة (السورجم)، وفول الصويا المنزرعة تحت الكثافات النباتية العادية، كانت ٤.٢، ٣.٥، ٦.٧ على الترتيب، ولذلك فإن مساحة السطح الورقي لكل نبات هو العامل المحدد لعدد النباتات اللازم للوصول إلى دليل مساحة الأوراق الحرج (شكل ٤-١٠). كما أن زاوية الورقة على النبات قد تغير من قيمة LAI الحرج، وبالتالي تتغير الكثافة المثلى للنبات (شكل ٤-١٠).

٢- التفريع Tillering (Branching)

تختلف نباتات المحاصيل المختلفة في قدرتها على تكوين أفرع، ويعتبر التفريع وسيلة فعالة لزيادة السطح الورقي لكل نبات، كما أن التفريع يعمل على تعويض النقص في عدد النباتات في الحقل والناتج عن نقص نسبة الإنبات أو الإصابة بالحشرات أو الأمراض، أي أن النباتات التي تكون أفرع يكون لها قدرة تعويضية عالية، ولذلك فإن درجة تأثرها بالكثافة النباتية يكون أقل من مثيلتها التي لا تكون أفرع. والمثال على ذلك، أنه وجد في نباتات الذرة الرفيعة الحبوب التي تتفرع من عقد الساق القريبة من أو أسفل سطح التربة، أن عدد النورات في الإيكر (الإيكر = ٠,٩٦ فدان) قد زادت زيادة طفيفة عندما تغيرت



شكل (٣-١٠). مساحة السطح الورقي/ نبات في الذرة الشامية، السورجم، وفول الصويا المنزرعة في كثافة نباتية مثلى، ودليل مساحة أورق كل منها. (Gardner, *et.al.* 1985).

كثافة النباتات من ١٣٠٠٠ إلى ٥٢٠٠٠ نبات/ إيكر (شكل ٤-١١)، وهذا يدل على أنه في حالة الكثافة النباتية ١٣٠٠٠ نبات، قد تكون على كل نبات أكثر من ثلاثة أفرع يحمل كل منها نورة، ولكن عندما تضاعفت كثافة النباتات من ٥٢٠٠٠ إلى ١٠٤٠٠٠ نبات/ إيكر، فإن عدد النورات بالإيكر قد تضاعف فقط، وهذا يدل على أن عدد الأفرع الذي تكون على كل نبات في حالة الكثافة النباتية ٥٢٠٠٠ نبات/ إيكر كان أقل عنه في الكثافة النباتية ١٣٠٠٠ نبات/ إيكر، من ذلك يتضح أن زيادة عدد النباتات عن حد معين لا يؤدي إلى زيادة محصول الحبوب، لأنه كلما زاد عدد النورات في وحدة المساحة كلما قل عدد الحبوببالنورة (شكل ٤-١١). وعلى العكس من ذلك، فإن أصناف الذرة الشامية المنتجة في الآونة الأخيرة لا تتفرع كثيرا حتى في الكثافة النباتية المنخفضة، وتكون كوز واحد غالبا على النبات، ولذلك فإن محصول الذرة الشامية من الحبوب يكون حساسا جدا لكثافة النباتات بالمقارنة بمحصول الذرة الرفيعة

الحبوب (السورجم)، لأن كلا من دليل مساحة الأوراق وعدد الكيزان يزداد أو يقل تبعا لكثافة النباتات، كما أن نباتات الذرة الشامية ليس لها المرونة الموجودة لدى أنواع المحاصيل التي تتفرع والتي يمكن أن تزيد من مساحة السطح الورقي، وعدد الوحدات المنتجة وذلك عن طريق التفريع، عند زراعتها في كثاقات نباتية منخفضة، كما سبق أن ذكرنا في الذرة الرفيعة الحبوب (شكل ٤-١١).

٣- الرقاد

إن زيادة كثافة النباتات عن الحد الأمثل يؤدي إلى صغر وضعف النباتات والسيقان، وغالبا زيادة طول سيقانها، وهذا يسبب رقادها (ميل النباتات نحو الأرض)، ولذلك فإنه يمكن مقاومة أو تقليل الرقاد عن طريق زراعة أصناف ذات سيقان قوية، أو زراعة النباتات بكثافات نباتية منخفضة.

وعموما- يؤدي رقاد النباتات إلى الأضرار الآتية:

١- يؤدي رقاد النباتات إلى إختلال نظام وضع الأوراق على الساق، وهذا يؤدي إلى زيادة تظليل الأوراق بعضها لبعض، مما يؤدي إلى النقص الشديد في كفاءتها في عملية التمثيل الضوئي.

٢- يؤدي الرقاد إلى نقص مساحة المقطع العرضي للحزم الوعائية، وهذا يؤدي إلى إعاقة حركة المواد الغذائية الممثلة، وكذلك إعاقة إمتصاص العناصر الغذائية عن طريق الجذور، وهذا يؤدي إلى نقص كمية الحصول.

٣- كما يؤدي الرقاد أيضا إلى صعوبة عملية الحصاد الآلي، وهذا يؤدي إلى زيادة تكاليف الإنتاج.

ب-الظروف البيئية

تؤثر الظروف البيئية على عدد النباتات الأمثل والذي يعطي أعلى محصول. وأهم العوامل البيئية التي تؤثر في هذا الشأن هي، شدة الإضاءة، الرطوبة الأرضية، خصوبة التربة والتسميد.

ويؤدي نقص شدة الإضاءة التي تتعرض لها النباتات إلى نقص عدد النباتات اللازم للوصول إلى أعلى محصول.

نقص الرطوبة الأرضية يؤدي إلى نقص مساحة السطح الورقي أثناء فترة النمو الخضري، وهذا يؤدي بدوره إلى نقص كثافة النباتات المثلى.

نقص كلا من خصوبة التربة والتسميد يؤديان إلى نقص العدد الأمثل من النباتات للوصول إلى أعلى محصول.

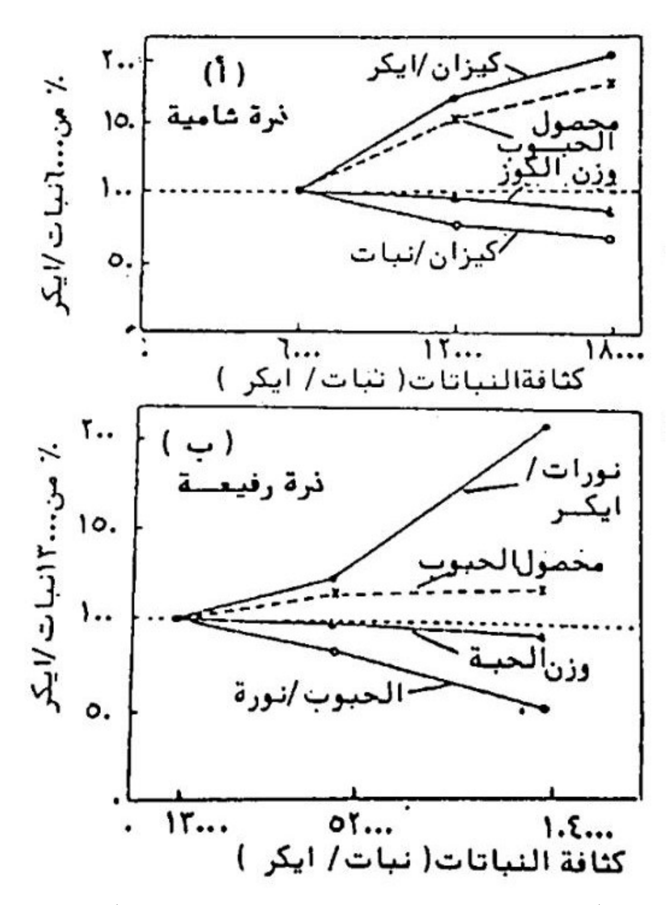
وبالإضافة إلى هذه العوامل البيئية السابقة، فإن الحشائش التي تنمو مع المحصول، تتنافس معه على هذه العوامل البيئية (الضوء، الرطوبة والعناصر الغذائية الموجودة بالتربة) مما يسبب تقليل الكثافة النباتية المثلى للمحصول المنزرع، وهذا النقص يتناسب مع درجة انتشار الحشائش في الأرض المنزرع بها المحصول.

كثافة النباتات وعلاقتها بكمية المحصول

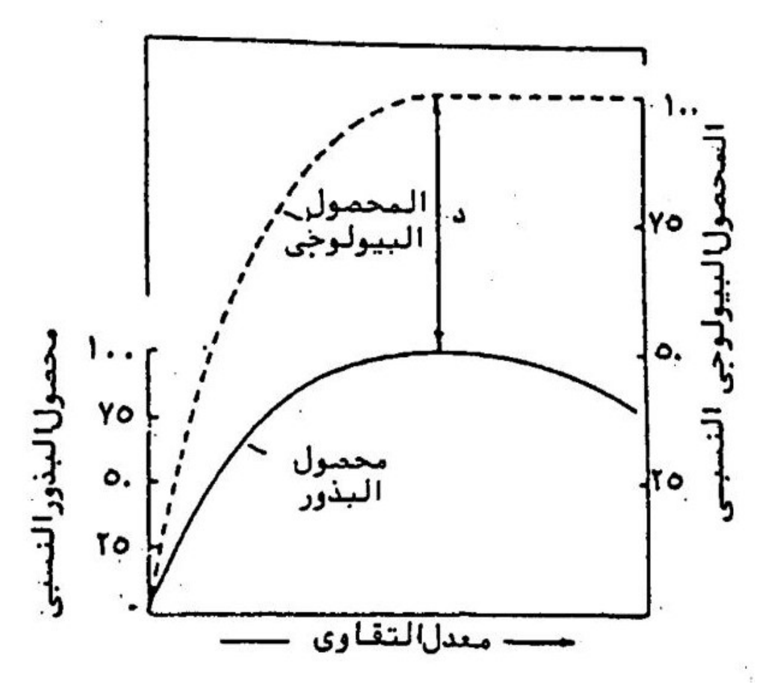
إن كمية المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات (النبات كله) يطلق عليها "المحصول البيولوجي Biological yield"، وأن الجزء من المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات والتي تتحول إلى ناتج إقتصادي (مثل الحبوب في محاصيل الحبوب) بـ"المحصول الإقتصادي Economic yield"، ولقد وجد أنه عند عندما يزرع المحصول من أجل الحصول على الحبوب (المحصول الإقتصادي)، فإنه توجد كثافة نباتية مثلى للوصول إلى أقصى محصول حبوب، وأن زيادة الكثافة النباتية عن هذا الحد الأمثل، تؤدي إلى نقص المحصول الإقتصادي، والسبب في ذلك هو أن نسبة كبيرة من ناتجات التمثيل الضوئي تستهلك في النمو الخضري والتنفس، ونسبة قليلة تستغل في تكوين ونمو البذور، أي المحصول الإقتصادي.

ولقد وجد أن محصول الحبوب (المحصول الإقتصادي) يصل إلى أقصاه تقريبا، عند الكثافة النباتية التي عندها يصل المحصول البيولوجي إلى حده الأقصى، ثم يثبت كما هو مبين بشكل (٣-١٢). وعند هذه الكثافة النباتية، فإن أي زيادة في المحصول الكلي للفدان ناتجة عن زيادة عدد النباتات في وحدة المساحة عن الحد الأمثل يقابل بنقص في وزن النبات الفردي.

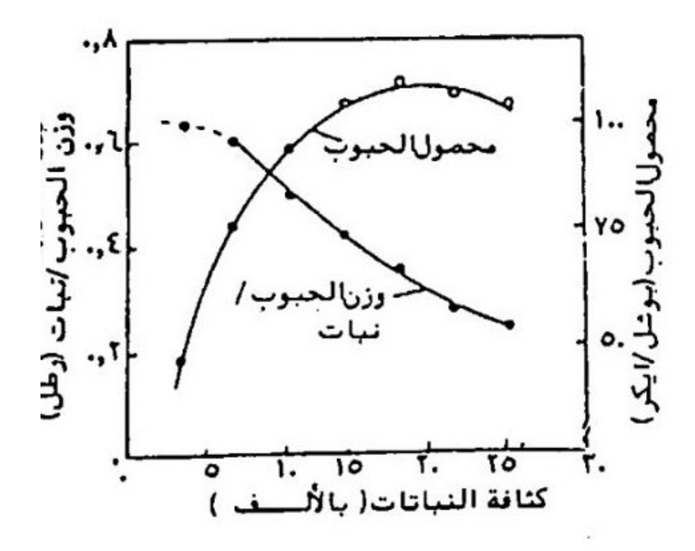
ويبين شكل (٣-١٣) العلاقة بين كثافة النباتات والمحصول في الذرة الشامية، ويتضح من الشكل أن محصول النبات الواحد يقل، كلما زاد عدد النباتات في وحدة المساحة، بينما ازدادت كمية محصول وحدة المساحة بزيادة كثافة النباتات، حتى تصل كثافة النباتات إلى حد أمثل، يصل عنده محصول وحدة المساحة إلى حده الأعلى، ثم تقل كمية محصول وحدة المساحة من الأرض بزيادة كثافة النباتات عن هذا الحد.



شكل (٣-١١). تأثير كثافة النباتات على المحصول ومكوناته في: أ- الذرة الشامية، ب- الذرة الرفيعة. (Gardner, *et.al.* 1985).



شكل (٣-١٢). علاقة معدل التقاوي بمحصول البذور (المحصول الإقتصادي) وبالمادة الجافة الكلية (المحصول البيولوجي) (Gardner, *et.al.* 1985)



شكل (٣-١٣). العلاقة بين المحصول وكثافة النباتات في الذرة الشامية (دانكن، ١٩٥٨).

استجابة نباتات المحاصيل للكثافات النباتية المختلفة

تتعرض نباتات المحصول الواحد المنزرعة معا تحت ظروف الحقل إلى نوعين من التنافس هما:

التنافس بين النباتات وبعضها Interplant competition

وتنافس داخل النبات نفسه Intraplant competition

فعندما تزرع النباتات على مسافات واسعة، أي بكثافة نباتية منخفضة، فلا تعاني النباتات في مراحل نموها الأولى أي من هذين النوعين من التنافس عادة، إذ ماتزال العناصر البيئية المتاحة تزيد عن احتياجات النباتات، ولذلك فتنمو النباتات نموا أمثل، ويتكون عليها عددا كبيرا من الأزهار والثمار. وبعد تكوين هذا العدد الكبير من الأزهار والثمار على النبات الواحد يزداد التنافس بينها على نفس النبات على المواد الغذائية النتاجة من التمثيل الضوئي، ويؤدي هذا إلى تساقط نسبة من هذه الأزهار والثمار، وهذا الفقد في الأزهار والثمار يكون كبيرا عند الزراعة على مسافات واسعة نسبيا، وهذا يؤدي إلى نقص كمية المحصول في وحدة المساحة من الأرض.

يتضح مما سبق أن زراعة النباتات على مسافات واسعة (كثافة نباتية منخفضة) يؤدي إلى فقد في المساحة المنزرعة من الأرض، وزيادة التنافس داخل النبات نفسه، وهذا يؤدي إلى نقص المحصول في وحدة المساحة من الأرض، بالمقارنة بالنباتات المنزرعة بكثافات نباتية أعلى من ذلك نسبيا.

وعند زراعة النباتات في كثافة نباتية مثلى (متوسطة)، فيظهر التنافس بين النباتات وبعضها في طور مبكر نسبيا، هو استبداء تكوين مبادئ الأزهار على النبات الواحد، وهذا يؤدي إلى نقص عدد النورات أو الأزهار التي تتكون على نفس النبات. ويتوقف مقدار هذا النقص في البراعم الزهرية والنورات والأزهار، على درجة التنافس بين النباتات وبعضها على العوامل البيئية، ولذلك ففي كثافة النباتات المثلى هذه، يصل عدد البذور في كل نورة، وعدد البذور في كل وحدة مساحة من الأرض إلى أعلى قيمة.

وعند زراعة النباتات بكثافة نباتية، تزيد عن الحد الأمثل، فإن التنافس بين النباتات وبعضها، يكون عاليا جدا في وقت تكوين مبادئ الأزهار، وهذا يعمل على نقص عدد البذور، التي تتكون على كل نبات، وبالتالي نقص نقص محصول بذور النبات الواحد، وبالتلي محصول وحدة المساحة من الأرض لأن المنافسة بين النباتات تكون عالية، بالمقارنة بالنباتات المنزرعة بكثافة نباتية أقل من ذلك.

٤- تأثير توزيع النباتات بالحقل على اعتراض الأشعة الشمسية

إن التوزيع المنتظم للنباتات بالحقل، يؤدي بدوره أيضا إلى إنتظام توزيع الكساء الخضري للنباتات بالحقل، وزيادة كفاءته في اعتراض الأشعة الضوئية الساقطة عليه، والإستفادة منها. ولكن قد لا تتوزع النباتات توزيعا منتظما بالحقل، إذ توضع البذور عند الزراعة في التربة بواسطة آلات التسطير أو يدويا، في سطور أو على خطوط منفصلة (متباعدة) عن بعضها، وحيث أن عدد البذور المراد زراعتها في وحدة المساحة يمكن أن يوزع على الأرض بطرق مختلفة، وذلك على حسب المسافة بين الخطوط أو السطور، وكذلك المسافة بين النباتات في الخط أو السطر الواحد، فإنه كلما زاد عرض الخط أو المسافة بين السطور، فإنه يلزم وضع عددا أكبر من البذور في كل خط أو سطر، حتى يمكن الوصول إلى الكثافة النباتية المطلوبة، والعكس عندما يكون عرض الخط أو المسافة بين السطور قليلة.

ولقد وجد أن انتظام مسافات الزراعة بين النباتات في الحقل تعمل على زيادة كفاءة الكساء الخضري لهذه النباتات في إعتراض أكبر كمية من الضوء الساقط عليه، وذلك بعد وقت قصير من الزراعة، كما هو مبين بشكل (٣-١٤).

ولقد وجد أنه كلما زادت المسافة بين السطور أو الخطوط تصبح المسافات بين النباتات أقل داخل السطر الواحد، ويظهر التنافس بين النباتات وبعضها داخل السطر أو الخط الواحد، بعد وقت قصير من الزراعة، وهذا يؤدي إلى نقص المحصول، إذ أنه عندما تكون السطور أو الخطوط متباعدة، فإنه يجب زراعة النباتات متقاربة داخل السطر أو الخط الواحد، حتى يمكن الوصول إلى العدد الأمثل من النباتات في وحدة المساحة، كما سبق أن ذكرنا.

يتضح من شكل (٣-١٤)، أنه كلما قلت المسافة بين السطور وزادت المسافة بين النباتات داخل السطر الواحد، كلما زاد انتظام توزيع النباتات بالحقل، وهذا يمكن النباتات من إعتراض أكبر كمية من الضوء الساقط عليها بعد فترة قصيرة من الزراعة.

ولقد وجد أن نقص المسافة بين السطور (الخطوط)، يؤدي إلى زيادة كمية المحصول في كثير من محاصيل الحقل، إذ أن السطور أو الخطوط المتقاربة، مع إنتظام المسافة بين النباتات داخل الخط أوالسطر الواحد، تؤدي إلى سرعة نمو الكساء الخضري، واعتراضه لمعظم الأشعة الضوئية الساقطة على النباتات ، وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة كمية المحصول.

تغطية سطح الأرض في بداية الإزهار	ذرة شامية ٢١ ألف نبات/ فدان	المسافة داخل السطر الواحد	المسافة بين السطور
		٦	٤٠
		٨	٣٠
		١٢	٢٠
		٢٤	١٠

شكل (٣-١٤). نظم توزيع بذور الذرة الشامية، وفول الصويا عند زراعتها في سطور تبعد عن بعضها بمسافة ٤٠، ٣٠، ١٠،٢٠ بوصة. ويبين الشكل أيضا تأثير المسافة بين السطور على كفاءة نباتات فول الصويافي تغطية سطح التربة (عن جاردنر وآخرون، ١٩٨٥).

العوامل التي تؤثر على المسافة بين السطور أو الخطوط

هناك بعض العوامل التي تؤثر على المسافة بين السطور أو الخطوط ومن هذه العوامل، نوع المحصول المنزرع، ميعاد الزراعة، وتوفر الرطوبة.

١- المحصول المراد زراعته

تختلف الكثافة النباتية المثلى (التي تعطي أعلى محصول) من محصول لآخر، إذ أن المحاصيل ذات النباتات الكبيرة الحجم، وذات مساحة ورقية كبيرة، تزرع في كثافات نباتية منخفضة، كما سبق أن ذكرنا، كما هو الحال في الذرة الشامية. إن مثل هذه المحاصيل تستجيب بدرجة أقل إلى تقليل المسافة بين الخطوط (أو السطور)، بالمقارنة بالنباتات صغيرة الحجم، مثل فول الصويا والقمح والتي تنمو في كثافات نباتية أكبر.

٢- ميعاد الزراعة

يؤثر ميعاد الزراعة على كثافة النباتات، وكذلك على المسافة بين السطور، والمثال على ذلك، أنه عند زراعة نباتات فول الصويا والذرة الشامية في ميعاد متأخر، يؤدي ذلك إلى قصر النباتات وصغر حجمها، نتيجة لتأثير طول الفترة الضوئية المهيئة للإزهار، ولذلك يجب زيادة كثافة النباتات، وتضييق المسافة بين السطور أو الخطوط، للوصول إلى أعلى محصول، وعلى العكس من ذلك عند زراعة النباتات في ميعاد مبكر.

٣- توفر الرطوبة

يؤثر توفر الرطوبة على كثافة النباتات والمسافة بين السطور أو الخطوط، فمثلا نقص الرطوبة الأرضية، أو تعرض النباتات لفترات من الجفاف أثناء نموها، فإن تضييق المسافة بين الخطوط أو السطورتؤدي إلى زيادة كمية المحصول في معظم محاصيل الحقل. ويعزي ذلك إلى أن النباتات المنزرعة في سطور متقاربة، تعاني من نقص الرطوبة الأرضية بسرعة، أكبر من مثيلتها المنزرعة في سطور متباعدة، وهذا يؤدي بدوره أيضا إلى أن النباتات المنزرعة في خطوط (سطور) متقاربة، تصبح أقل ارتفاعا وحجما، وذات دليل مساحة أوراق أقل، وهذا يؤدي إلى نقص محصولها.

مما سبق يتضح أنه ليس المهم فقط زراعة العدد الأمثل من النباتات في وحدة المساحة للوصول إلى أعلى محصول، ولكن يجب توزيع هذا العدد الأمثل توزيعا منتظما بالحقل، عن طريق تحديد المسافة بين الخطوط أو السطور، والمسافة بين النباتات في السطر أو الخط الواحد.

وأن كلا من علماء فسيولوجيا المحاصيل وتربية النبات يحاولون تحديد التراكيب الوراثية، التي توافق الزراعة في كثافات عالية وخطوط ضيقة نسبيا.

مما سبق يتضح أن الكمية الكلية من المادة الجافة التي يكونها النبات، تنتج من كفاءة الكساء الخضري في اعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه، والإستفادة منها أثناء نمو المحصول. وأن أعضاء النبات الأساسية في إعتراض الأشعة الشمسية هي الأوراق.

إن استراتيجية زيادة الإستفادة من الأشعة الشمسية الساقطة على الكساء الخضري للنباتات المنزرعة، وبالتالي زيادة المحصول، تشتمل على الآتي:

١- الزراعة في ميعاد مبكر، حتى تتمكن النباتات من تكوين مساحة ورقية كبيرة، وبسرعة تغطى سطح التربة، وتعترض أكبر كمية من الطاقة الشمسية الساقطة على النباتات.

٢- الزراعة بالكثافة النباتية المثلى، والتي تؤدي إلى تكوين دليل مساحة أوراق أمثل، وذلك عندما تصل النباتات إلى تكوين أقصى مساحة ورقية.

٣- الزراعة في الميعاد المناسب، بحيث تتوافق تغطية سطح الأرض بواسطة الكساء الخضري تغطية تامة، أثناء الفترة التي تصل فيها شدة الإضاءة إلى أقصاها، مما يؤدي إلى زيادة الإستفادة من الأشعة الشمسية الساقطة على النباتات بأقصى درجة.

٤- زراعة النباتات بالحقل على أبعاد منتظمة بقدر المستطاع لتقليل التنافس بين النباتات، وزيادة معدل اعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية الساقطة على النباتات.

٥- الإهتمام بتسميد النباتات لزيادة معدل نموها وكفاءة التمثيل.

٦- العمل على إطالة الفترة التي تظل فيها الأوراق قائمة بالتمثيل الضوئي، وذلك بعد الوصول إلى دليل مساحة الأوراق الأمثل، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة إعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية وكفاءة التمثيل، وزيادة المحصول.

الباب الرابع

النمو والتكشف (التكوين) في نباتات محاصيل الحقل

يعتبر النمو Growth والتكشف (التكوين) Development من أهم العمليات الضرورية للحياة والتكاثر في الكائنات الحية، وتستمر هاتان العمليتان أثناء دورة حياة النبات بشرط وجود الميرستيمات، وتوافر المواد الغذائية الناتجة عن عملية التمثيل الضوئي والهرمونات وغيرها من المواد اللازمة للنمو، وتوافر الظروف البيئية الموافقة أيضا. ومن الناحية العملية يتحكم في نمو أي نبات كلا من العوامل الوراثية لهذا النبات المنزرع والظروف البيئية المحيطة، إذ أن بعض صفات النبات تتأثر أساسا بالتركيب الوراثي للصنف المنزرع، بينما تتأثر صفات أخرى بالظروف البيئية المحيطة بالنبات. وبذلك فيعتبر نمو النبات محصلة لتفاعل تركيبه الوراثي مع العوامل البيئية النامي فيها. وعلى سبيل المثال، النبات الذي يحمل عوامل النمو والإنتاج المرتفع لا تظهر كفاءته إلا إذا توافرت له الظروف البيئية المثلى لذلك.

إن الهدف الذي يصبو إليه منتج المحاصيل هو مضاعفة معدلات النمو والمحصول للمحاصيل المنزرعة، عن طريق تحسين التراكيب الوراثية للنباتات المنزرعة، وتعديل الظروف البيئية النامي فيها النباتات، ويمكن تعديل التراكيب الوراثية للنباتات المنزرعة عن طريق التربية والإنتخاب. ويمكن تحسين الظروف البيئية المحيطة بالنباتات عن طريق الزراعة في المواعيد المناسبة، وإختيار طريقة الزراعة المناسبة، وإختيار المنطقة الملائمة للصنف المراد زراعته، والإهتمام بعمليات خدمة المحصول بعد الزراعة مثل الري والتسميد ومقاومة الآفات وغيرها.

تعريف النمو

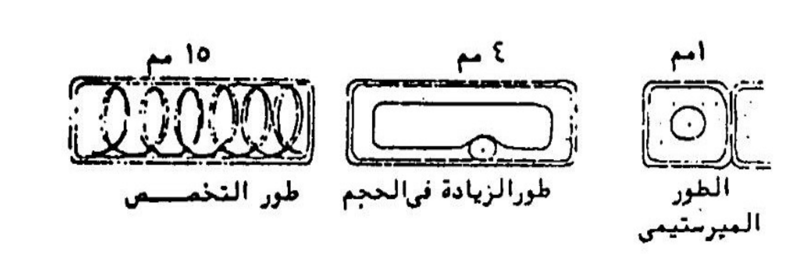
يعرف النمو بأنه عبارة عن الزيادة المستمرة والغير عكسية في الوزن أو الحجم أو كليهما، كما يعرف أيضا بأنه عبارة عن انقسام الخلايا Cell division (زيادة عددها) وزيادتها في الحجم Cell enlargment، وتعتبر عملية تمييز الخلايا Differentiation أو تخصص الخلايا Cell specialization جزءا من النمو، وأن تكوين النبات Plant development يحتاج كلا من نمو وتمييز (تخصص) الخلايا، أي أن النمو ينتج عن إنقسام الخلايا وزيادتها في الحجم وتخصصها.

ويعرف المشتغلون بإنتاج وفسيولوجيا المحاصيل النمو بأنه، عبارة عن الزيادة في المادة الجافة. وهذا التعريف يشمل عملية التخصص والتي تساهم بدرجة كبيرة في تراكم المادة الجافة. وأن مقدار المادة الجافة التي تتراكم بالنبات، تستخدم كمقياس يعبر عن النمو، وذلك لأهمية المادة الجافة من الناحية الإقتصادية. وبالإضافة إلى المادة الجافة، يمكن إستخدام إرتفاع النبات، ومساحة السطح الورقي، كمقياس لمعدل النمو، بينما يعتبر الوزن الغض للنبات، قليل الأهمية كمقياس للنمو، نتيجة لتذبذبها المستمر، وفقا لمحتوى النبات من الرطوبة، وعلى العكس من ذلك فيهتم منتجي الخضر والفاكهة والزهور بالوزن الغض أكثر من الوزن الجاف، وذلك لأن الوزن الغض في هذه النباتات يكون مرتبطا بصفات الجودة.

أطوار نمو الخلية النباتية

يبين شكل (٤-١) أطوار نمو الخلية النباتية وهذه الأطوار هي:

١- الطور الميرستيمي: يتكون في هذا الطور خلايا جديدة ناتجة عن إنقسام الخلايا الميرستيمية، وتبقى بعض الخلايا الناتجة عن هذا الإنقسام ميرستيمية، بينما ينمو البعض الآخر منها في الطور التالي إلى خلايا بالغة، ولذلك فإن النمو في هذا الطور يقتصر على الزيادة في عدد ووزن الخلايا، بينما تكون الزيادة في الحجم ضئيلة جدا، لأن حجم الخلية الميرستيمية يكون مساويا تقريبا لحجم الخليتين الناتجتين عن إنقسامها (شكل ٤-١).



شكل (٤-١). أنواع مختلفة من الخلايا (أطوار نمو الخلية) في قمة جذر الذرة الشامية

٢- **طور الزيادة في الحجم:** في هذا الطور ينمو جدار الخلية الحديثة بمعدل أسرع من معدل نمو البروتوبلازم، فيظهر في البروتوبلازم فجوات صغيرة عديدة، ويفقد شكله الميرستيمي، ككتلة صماء، ثم تتجمع هذه الفجوات الضغيرة، مكونة فجوة كبيرة واحدة، تكون مملوءة بالعصير الخلوي الذي يزداد في الحجم، بسبب إمتصاص الخلية للماء، فتنتفخ الخلية ويصبح حجمها أكبر بكثير من حجم الخلية الميرستيمية الأصلية التي نشأت منها، وعندئذ يكتمل نمو الخلية في الحجم، بسبب إمتصاص الماء بالخاصية الإسموزية.

٣- **طور التمييز (التخصص):** في هذا الطور تبدأ الخلية في التخصص لأداء وظيفة معينة بالنبات، حيث تأخذ شكلا وتركيبا ثابتا ومناسبا لأداء وظيفتها ومن أمثلة الخلايا المتخصصة بالنبات: الخلايا البرانشيمية، والخلايا الكولنشيمية ، والخلايا الإسكلرانشيمية وخلايا نسيج الخشب واللحاء وغيرها. ولذلك فإن النمو في هذا الطور (التخصص) ينحصر أساسا في زيادة وزن الخلية، بسبب ما يتراكم ويترسب على جدرانها من مواد مختلفة تختلف باختلاف الخلية.

عموما- لا يحدث النمو تحت الظروف العادية إلا عندما تزيد ناتجات التمثيل الضوئي عن تلك التي تستهلك في التنفس، أما إذا حدث العكس، فهذا يعني أن إستهلاك الغذاء يفوق عملية تكوينه، ولذلك فبقف النبات عن النمو، وإذا استمرت هذه الحالة فإن النبات يموت في النهاية.

الميرستيمات Meristems

إن نمو النباتات الذي يحدث نتيجة لإنقسام الخلايا وتكوين خلايا جديدة تكبر في الحجم لا يحدث في جميع أجزاء النبات، ولكن يحدث في أنسجة معينة يطلق عليها "الأنسجة الميرستيمية Meristims tissues" ، والمناطق التي توجد بها هذه الميرستيمات يطلق عليها "مناطق النمو Growth regions". ويتكون

النسيج الميرستيمي من خلايا صغيرة الحجم يطلق عليها "الخلايا الميرستيمية"، وتنقسم كل خلية باستمرار إلى خليتين مكونة خلايا جديدة في النبات، كما سبق ذكره.

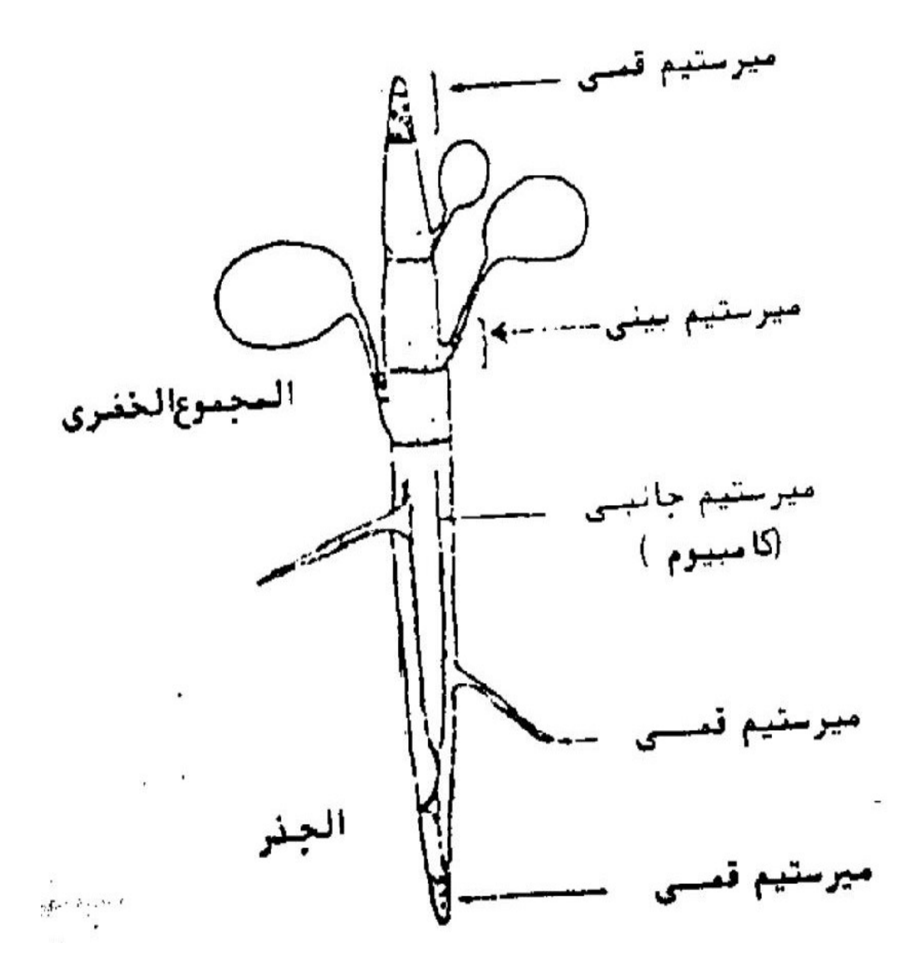
موضع الميرستيمات في النبات

تنقسم الميرستيمات الموجودة في النبات على حسب موضعها بالنبات إلى:

١- **الميرستيم القمي Apical meristem:** ويوجد في قمم السيقان والجذور، وبعض أوراق النباتات، ويسبب زيادة النمو الطولي لهذه الأعضاء شكل (٤-٢).

٢- **الميرستيم البيني Intercalary meritem:** ويوجد عادة بين نسيجين مستديمين في أعضاء معينة من النبات (شكل ٤-٢)، والمثال على ذلك، الميرستيم البيني الذي يوجد بين العقدة والسلامية، او بين نصل الورقة والغمد في النباتات النجيلية، مثل الذرة والقمح والقصب وغيرها، وعند حدوث رقاد لمثل هذه النباتات فإن الميرستيم البيني ينمو عن طريق إستطالة الخلايا بمعدلات مختلفة على محيط الساق، وهذا يؤدي إلى إعادة الوضع القائم للساق من جديد. وأن الميرستيم البيني الذي يوجد عند قاعدة أنصال الأوراق والأغماد يعمل على إستطالة الأوراق.

٣- **الميرستيم الجانبي Lateral meristem:** هذا الميرستيم ينتج خلايا جديدة تسبب زيادة سمك العضو النباتي، والمثال على ذلك، الكامبيوم الوعائي Vascular cambium، والذي يتكون منه اللحاء الثانوي للخارج والخشب الثانوي للداخل، ويمتد الميرستيم الجانبي على مدى جزء كبير من طول الجذر والساق شكل (٤-٢). والنوع الثاني من الميرستيم الجانبي يوجد عند أطراف الأوراق الحديثة التكوين وتامة الإنبساط.



شكل (٤-٢). الميرستيمات النباتية

ارتباطات النمو Growth correlations

إن نمو كل عضو من أعضاء نبات ما، يتأثر بالعمليات الفسيولوجية السائدة والموجودة في عضو أو أعضاء أخرى على نفس النبات، وعلى سبيل المثال، يتأثر النمو الخضري لكثير من النباتات أثناء فترة النمو الثمري، كما يتأثر حجم المجموع الجذري بكفاءة التمثيل الضوئي للأوراق. وبذلك فقد يؤثر نمو عضو نباتي على نمو عضو آخر على نفس النبات. وأن العلاقة بين معدلات نمو الأجزاء المختلفة لعضو معين من أعضاء النبات (مثل العلاقة بين طول وعرض الورقة، والعلاقة بين طول وقطر الثمرة)، أو بين الأجزاء

المختلفة للنبات (مثل العلاقة بين المجموع الخضري والمجموع الجذري)، ويطلق عليها بـ"ارتباطات النمو أو Allometry".

وأن حساب العلاقات بين معدلات نمو الأجزاء الفردية لعضو بالنبات أو بين الأعضاء المختلفة للنبات، يعطي قيما تقريبية ذات دلالة مورفولوجية أو فسيولوجية ذات أهمية لمنتج المحاصيل.

عموما- يهتم منتج محاصيل الحقل بارتباطات النمو الآتية:

١- نسبة المجموع الخضري إلى المجموع الجذري،
٢- نسبة النمو الخضري إلى النمو الثمري،
٣- نسبة بين النمو والتخصص،
٤- الغلاقة بين النمو القمي والنمو الجانبي،
٥- نسبة بين المحصول الإقتصادي والمحصول البيولوجي.

١- النسبة بين المجموع الخضري إلى المجموع الجذري

إن نسبة المجموع الخضري إلى المجموع الجذري Shoot-root ratio وتختصر إلى (S-R ratio)، تعتبر ذات دلالة فسيولوجية، إذ أنه يمكن أن يعطي دلالة على مقاومة النباتات للجفاف والملوحة، ولقد وجد المؤلف عام ١٩٨٤م، أن نباتات الذرة الرفيعة الحبوب الأكثر مقاومة للجفاف تميزت بنسبة مجموع جذري إلى مجموع خضري عالية. كما تعتبر نسبة المجموع الخضري إلى المجموع الجذري ذات أهمية لمنتج المحاصيل الجذرية والدرنية، والتي فيها تعتبر الجذور والدرنات هي المحصول الإقتصادي. ولقد وجد أن التسميد الأزوتي يؤدي إلى زيادة نسبة المجموع الخضري إلى المجموع الجذري.

إن نقص محتوى التربة من الرطوبة، يسبب نقصا في نمو كلا من المجموع الخضري والجذري، ولكن النقص في النمو يكون أكبر في حالة المجموع الخضري عنه في الجذري. وينمو المجموع الخضري نموا قويا عادة عندما يكون التسميد الأزوتي والماء متوافرين للنبات بدرجة مثلى، بينما ينمو المجموع الجذري بنسبة أكبر من المجموع الخضري عندما تكون هذه العوامل محدودة وغير متوافرة بدرجة مثلى، وهذا ينعكس على نسبة المجموع الخضري إلى الجذري.

ويزداد معدل نمو المجموع الخضري بالنسبة لنمو المجموع الجذري بارتفاع درجات الحرارة، وذلك في النطاق الحراري المناسب لنمو

المحصول، بينما يقل في درجات الحرارة الأعلى أو الأقل من درجة الحرارة المثلى للمحصول.

يزداد نمو كلا من المجموع الخضري والمجموع الجذري بازدياد شدة الإضاءة، بينما يزداد وزن المجموع الجذري بالنسبة إلى وزن المجموع الخضري بنقص شدة الإضاءة.

وعموما- تختلف نسبة المجموع الخضري إلى الجذري باختلاف النوع النباتي، كما تختلف داخل النوع الواحد باختلاف طور النمو.

٢- نسبة النمو الخضري إلى النمو الثمري

إن النمو الخضري في كثير من النباتات الحولية ينتهي بالنمو الثمري (مثل محاصيل الحبوب)، وأثناء فترة النمو الثمري لا تتنافس الأوراق والسيقان والأجزاء الخضرية الأخرى مع الأزهار والثمار على المواد الممثلة بالنبات، بل تساهم هذه الأجزاء الخضرية بجزء من المواد الغذائية المتجمعة بها أثناء فترة النمو الخضري، وقبل تكوين النورات، وذلك عن طريق إنتقالها إلى النورات، وفي هذه المرحلة، يدخل النبات في مرحلة الشيخوخة وانتهاء دورة حياة النبات. وفي بعض المحاصيل التي تنمو خضريا وثمريا في نفس الوقت، فإن النمو الخضري يقل تحت الظروف العادية في مرحلة النمو الثمري، ويرجع ذلك إلى تحويل جزءا كبيرا من المواد الغذائية الميسرة بالنبات إلى الأزهار أو الثمار النامية، كما هو الحال في نباتات القطن.

ويهتم منتج المحاصيل الثمرية، مثل محاصيل الحبوب (الذرة والقمح وغيرها) ومحاصيل البقول (الفول، العدس، الترمس وغيرها)، بنسبة المجموع الخضري إلى المجموع الثمري. ويهدف منتج المحاصيل إلى زراعة أصناف تتميز بارتفاع نسبة المجوع الثمري إلى المجموع الخضري.

وتعتبر النسبة بين المجموع الخضري والثمري صفة وراثية إذ تختلف من محصول لآخر، وأيضا بين الأصناف المختلفة داخل النوع الواحد، كما تتأثر بالعوامل البيئية مثل الرطوبة الأرضية، التسميد، درجة الحرارة والإضاءة وغيرها.

يؤدي إرتفاع محتوى الرطوبة بالتربة النامي فيها النبات عن الحد الأمثل إلى زيادة نسبة وزن المجموع الخضري إلى المجموع الثمري للمحصول، ويرجع ذلك إلى نقص كمية المواد الغذائية الناتجة من عملية التمثيل الضوئي، والتي تستخدم في تكوين المجموع الثمري.

تؤدي زيادة التسميد الأزوتي إلى زيادة النمو الخضري ونقص النمو الثمري، كما هو الحال في القطن ومحاصيل البقول والمحاصيل الجذرية وغيرها. وعلى العكس من ذلك فإن التسميد الفوسفاتي يشجع إنتقال المواد الغذائية إلى المجموع الثمري، ويحد من النمو الخضري، ولذلك، فيعمل على زيادة نسبة المجموع الثمري إلى المجموع الخضري.

٣- النسبة بين النمو والتخصص

إن تكوين النبات ينتج عن عمليات النمو والتخصص معا كما سبق أن ذكرنا، والتي تؤدي إلى تكوين المادة الجافة بالنبات والتي بدورها تدخل في تكوينه. وأن العامل الأساسي اللازم لعملية التخصص هو وجود ناتجات تمثيل ضوئي زائدة عن احتياجات نمو النبات، وهذا يحدث عندما يكون النقص في معدل النمو أكبر من النقص في معدل التمثيل الضوئي، وذلك بفرض توافر درجات الحرارة المثلى والإنزيمات اللازمة. ومن العوامل التي تؤدي إلى نقص النمو بمعدل أكبر من النقص في التمثيل الضوئي هي نقص الرطوبة الأرضية والنيتروجين. ومن عمليات تخصص الخلايا هي زيادة سمك جدر الخلايا، وتجمع مواد معينة بالخلايا (مثل القلويدات والنشا والسكر وغيرها)

ومن العوامل التي تؤدي إلى نقص النمو بمعدل أكبر من التمثيل الضوئي، هي نقص الماء والنيتروجين، إذ أن تعرض النباتات إلى نقص هذه العوامل ينتج عنه فائض في ناتجات التمثيل الضوئي، وهذا يؤدي إلى عملية تخصص الخلايا.

يتضح مما سبق، أن إنتاج نواتج محصولية ذات نوعية معينة، يحتاج إلى تطبيق عمليات زراعية معينة، والتي من شأنها تحقيق التوازن المناسب بين النمو والتخصص، إذ أن النمو ضروري ولكن يجب ألا يشجع بدرجة كبيرة حتى لا يعيق عمليات التخصص، وعلى سبيل المثال، فإنه للحصول على محصول مرتفع من السكروز في المحاصيل السكرية مثل قصب السكر وبنجر السكر، أو الزيت في المحاصيل الزيتية فإنه يجب إتباع الآتي:

أ- الإعتناء جيدا بعمليات الري والتسميد في المقام الأول في الفترات الأولى من حياة النبات، وذلك بغرض تشجيع النمو الخضري للنباتات، أي تكوين جهاز تمثيل ضوئي كبير، وأعضاء تخزين أثناء فترة النمو الخضري والتي تحتاج إلى معظم طول موسم النمو، وكذلك تجميع كمية كبيرة من المادة الجافة أثناء المراحل الأولى من حياة النبات، وهذه المواد المتجمعة تساهم في

تكوين المحصول الإقتصادي، وهو السكروز في محاصيل السكر والزيت في محاصيل الزيت، وذلك أثناء الفترات المتأخرة من نموها.

ب- تعريض النباتات بعد ذلك في الفترات الأخيرة من حياته (أثناء تكوين المحصول الإقتصادي) إلى الظروف التي تؤدي إلى نقص النمو، وتؤدي في نفس الوقت إلى تشجيع عمليات التخصص مثل نقص الرطوبة الأرضية والتسميد الأزوتي.

٤- العلاقة بين النمو القمي والنمو الجانبي

إن النباتات المختلفة تتخذ شكلا مميزا لها، ويرجع ذلك بدرجة كبيرة إلى نمو كلا من البراعم القمية والجانبية. وفي بعض النباتات لا تنمو البراعم الجانبية مادام البرعم الطرفي محتفظا بقوته ومستمرا في النمو، مسببا النمو في الطول، وإذا أتلف هذا البرعم الطرفي أو أزيل صناعيا فإن النمو يبدأ عادة في الحال من برعم جانبي أو أكثر، وهذا التأثير المثبط الذي يبديه البرعم الطرفي على نمو البراعم الجانبية يسمى بـ"السيادة القمية Apical dominance". وينتج النمو الخضري الجانبي نتيجة لنمو البراعم الموجودة في إبط الأوراق، إذ تنشط البراعم الموجودة في آباط الأوراق القريبة من سطح الأرض وتكون أفرعا كما هو الحال في نباتات الحمص والترمس وغيرها. وفي المحاصيل النجيلية مثل القمح والأرز وغيرها، تنشط البراعم الموجودة في منطقة التاج الجذري Crown أسفل سطح التربة مباشرة، وتكون أفرعا (أشطاء Tillers)، وقد تتكون أفرعا خضرية من البراعم الإبطية الموجودة في أي موضع على الساق في بعض النباتات. ويؤدي نمو هذه البراعم الإبطية وتكوين نموات خضرية (أفرعا) إلى ملئ الفراغات الموجودة بين النباتات، وهذه صفة هامة في إنتاج المحاصيل، إذ أنه في حالة نقص نسبة إنبات التقاوي تحت ظروف معينة وغياب بعض النباتات، فإن النمو الجانبي يعمل على ملئ الفراغ الذي ينجم عن غياب هذه النباتات، أي أن النباتات عن طريق النمو الجانبي يكون لها قدرة تعويضية. وهنا تجدر الإشارة إلى أن النمو القمي وحده لا يؤدي هذا الغرض. ويعتبر الضوء هو العامل الرئيسي الذي يتحكم في النمو الجانبي الناتج عن البراعم الإبطية (الجانبية).

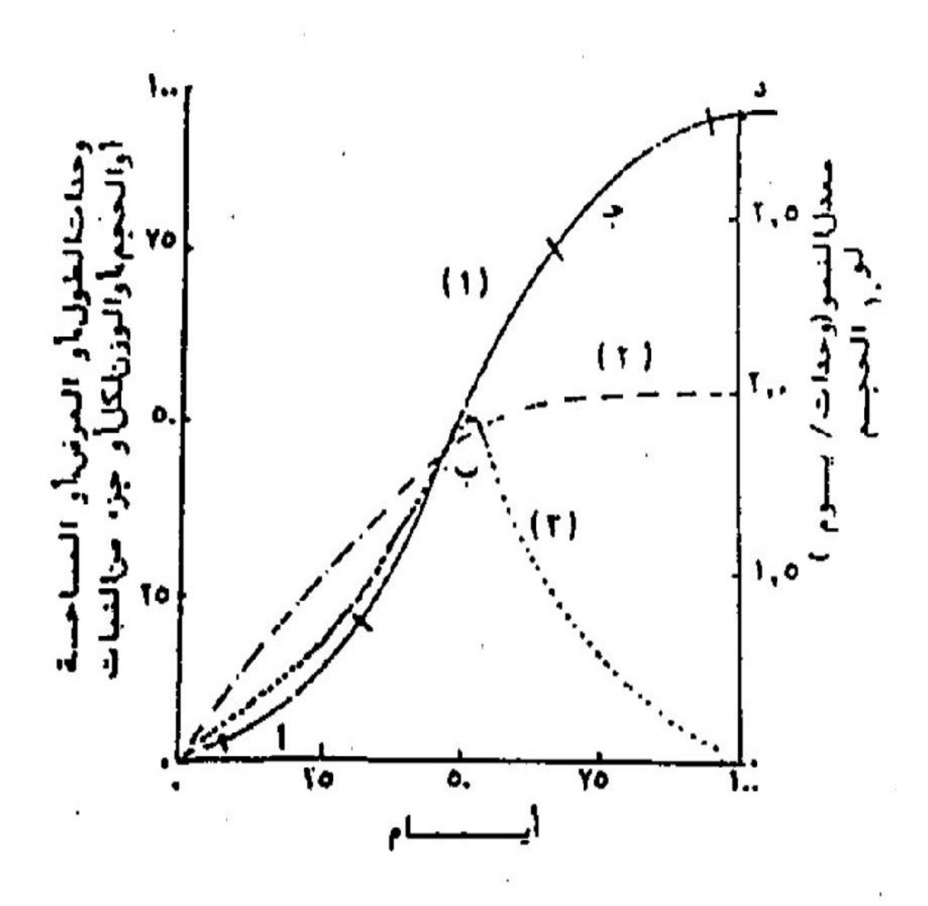
٥- النسبة بين المحصول الإقتصادي والمحصول البيولوجي

إن كمية المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات يطلق عليها بالمحصول البيولوجي Biological yield، وأن الجزء من هذه المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات والتي تتحول إلى ناتج إقتصادي يطلق عليها بالمحصول الإقتصادي Economic yield. وأن النسبة بين المحصول الإقتصادي والمحصول البيولوجي يطلق عليها دليل الحصاد Harvest index.

وسوف نوضح دليل الحصاد بشئ من التفصيل في الباب الخامس.

منحنى النمو Growth curve

إن نمو النبات خلال دورة حياته (من الإنبات حتى النضج) يأخذ شكل الحرف S أو ما يعرف بـ"المنحنى السيجمويدي Sigmoid curve"، حيث أنه إذا وقعت وحدات المادة الجافة أو مساحة الأوراق أو تراكم المواد الكيماوية مثل محتوى النبات من البروتين، مقابل الزمن على رسم بياني فإننا نحصل على منحنى على شكل الحرف S لكل صفة من هذه الصفات، كما هو مبين بشكل (٤-٣). ويلاحظ في هذا المنحنى أنه في بادئ حياة النبات يكون نمو البادرات بطيئا، وعادة يكون سالبا بالنسبة لوزن المادة الجافة المتراكمة (المتجمعة) بالبادرة لفترة قصيرة تتراوح من أسبوع إلى أسبوعين، ثم يلي هذه المرحلة فترة من النمو الأسي أو اللوغاريتمي Exponential or Logarithmic growth rate (مرحلة أ) وتتميز هذه المرحلة بفترة نمو خضري قصيرة نسبيا، ثم يلي هذه الفترة من النمو المرحلة الخطية Linear phase، وتستمر هذه المرحلة فترة أطول نسبيا من المراحل السابقة (مرحلة ب)، وأثناء هذه الفترة تكون زيادة وزن المادة الجافة ذات معدل ثابت تقريبا، وتحت ظروف الحقل، تعتبر هذه المرحلة من النمو دليلا على معدل نمو المحصول (CGR). ثم يتبع المرحلة الخطية، مرحلة النمو البطئ (مرحلة أسية هابطة أو متضائلة Dampened Exponetial مرحلة جـ)، وفي هذه المرحلة تقل الزيادة في النمو تدريجيا بمرور الوقت، حتى يصل إلى مرحلة الثبات Steady state (مرحلة د)، ويطلق على هذه المرحلة الثابتة بـ"النضج الفسيولوجي Physiological maturity" وفي هذه المرحلة تكون الزيادة في المادة الجافة متوازنة مع الفقد فيها، ويبين شكل (٤-٣) منحنى النمو السيجمويدي.



شكل (٤-٣). منحنى النمو السيجمويدي

إن النواحي الكمية للنمو يمكن تصورها جيدا عن طريق دراسة كائن حي وحيد الخلية مثل الخميرة، وبفرض توفر الظروف البيئية المثلى له، فإن عدد الخلايا المتكونة أثناء نموه، يمكن التنبؤ به كالآتي:

$$N_1 = N_0 \times 2$$

حيث أن:

N_1 = عدد الخلايا الفردية بعد الجيل الأول.

N_0 = العدد الأصلي (الأولي) للخلايا.

وبذلك فإنه في نهاية الجيل الأول فإن كل خلية يحل محلها خليتان، ولذلك فإن عدد الخلايا المتكونة في نهاية الجيل الثاني يصبح:

$$N_2 = N_0 \times 2 \times 2 = 2^2$$

وإذا كانت الفترة بين الأجيال ثابتة نسبيا، فإنه يمكن كتابة المعادلة كالآتي:

$N = N_0 e^{rt}$

حيث أن: e= ثابت = أساس اللوغاريتم الطبيعي = ٢.٧١٨٢،

r= المعدل النسبي للنمو (ثابت)،

t= الفترة الزمنية بين الأجيال،

وهنا تجدر الإشارة إلى أن منحنيات النمو، في النباتات الراقية، لا تنطبق تماما مع هذا الأسلوب الرياضي للأسباب الآتية:

١- الحالة الغذائية المثلى للنباتات الراقية وخصوصا النامية تحت ظروف الحقل غير ثابته دائما، إذ تقل المواد الغذائية المتاحة للنباتات بمرور الوقت، وتصبح في بعض الأحيان من العوامل المحددة للنمو.

٢- إن نسبة أعضاء التمثيل الضوئي وهي الأوراق التي يحملها النبات، والتي تقوم بتكوين المواد الغذائية، والتي تنتقل إلى باقي أجزاء النبات، مثل السيقان والأزهار والجذور تقل، عندما يزداد حجم هذه الأجزاء (السيقان والأزهار والجذور)، ولذلك فإن عملية تجهيز الغذاء لا تتماشى مع معدل النمو بمضي الوقت بعد زراعة النباتات، ولذلك فإنه تحت ظروف الحقل فإننا نتوقع زيادة النقص في المعدل النسبي للنمو تدريجيا، إلى أن تصل إلى الصفر في حالة موت الأوراق، ولذلك فإن النمو المطلق يقل تدريجيا إلى أن يتوقف نمو النبات.

٣- في النباتات الراقية، لا تستطيع جميع الخلايا الناتجة من الإنقسام أن تنقسم بنفسها، لأن معظمها يتميز إلى خلايا متخصصة وتتوقف عن النمو، كما سبق أن ذكرنا، على الرغم من أن النبات ينموبوجه عام، وهذا على عكس الكائنات وحيدة الخلية، كما سبق ذكره.

٤- تؤثر كثيرا من العوامل الخارجية والداخلية على نمو النباتات الراقية بطرق أكثر تعقيدا عنه في الكائنات وحيدة الخلية، ولا يرجع ذلك إلى عملية تكوين المواد الغذائية فقط، والمثال على ذلك، بادرات نباتات محاصيل الحقل التي تنمو في الظلام، تكون أطول من مثيلتها التي تنمو في الضوء، على الرغم من توفر كل الظروف الأخرى في الحالتين.

٥- بعض الأعضاء النباتية في النباتات الراقية لها نموا محدودا، كما هو الحال في الأوراق والأزهار، أي أن هناك حدا أقصى لعدد الخلايا وحجم العضو النباتي، ولكن هناك بعض النباتات التي لها قدرة على النمو غير المحدود إذ يستمر النمو عند توفر الظروف الملائمة.

تحليل نمو نباتات محاصيل الحقل Growth Analysis

إن الباحث في مجال فسيولوجيا المحاصيل، لا يكتفي عادة بتقدير المحصول النهائي وهو المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات في نهاية موسم النمو، بل يقوم بدراسة ظواهر النمو المختلفة، والعوامل المؤثرة عليها أثناء دورة حياة النبات، والتي قد يكون لها تأثيرا معنويا على المحصول النهائي، ويطلق على هذه الدراسة "تحليل نمو النبات". وأن تحليل نمو النبات يساعد في تحديد المراحل الحرجة في تكوين المحصول النهائي، والعوامل التي تتحكم في كل طور من أطوار نموه.

ويعتمد تحليل نمو النبات على القياس المتعاقب لصفتين رئيسيتين هما:

١- الوزن الجاف للنبات ككل أو لأعضائه المختلفة.

٢- مساحة السطح الورقي للنبات.

ومن البيانات المتحصل عليها لهذه الصفات يمكن حساب قيم شواهد أخرى للنمو ذات دلالة فسيولوجية أو مورفولوجية.

وإن الطريقة الشائعة في تحليل نمو النبات تتضمن أخذ قياسات على فترات منتظمة تتراوح بين ٧-١٥ يوما، وذلك على عدد كبير نسبيا من النباتات، أما الطريقة الأخرى، فتتضمن أخذ قياسات على فترات متقاربة نسبيا تتراوح بين ٢-٣ أيام، وذلك على عدد أقل من النباتات.

وعموما- يتوقف عدد النباتات بالعينة التي تؤخذ عليها القياسات على مقدار التباين بين النباتات.

وتحليل نمو النباتات يمكن أن يجرى على النباتات الفردية Single plants أو المجاميع النباتية Plant Communities (خليط من أنواع نباتية نامية معا)، أو عشائر نباتية (نباتات تابعة لنوع واحد نامية معا). وأن قيم شواهد النمو المتحصل عليها عند تحليل النباتات الفردية، يعبر عنها على أساس النبات الواحد. وعادة يجري علماء فسيولوجيا المحاصيل، تحليل نمو نباتات محاصيل الحقل على المجاميع النباتية أو العشائر النباتية تحت ظروف الحقل، ويتضمن تحليل النمو عادة علاقة نمو النباتات بمساحة الأرض التي تشغلها هذه النباتات. من ذلك يتضح أن هناك بعض القياسات أو المدلولات، والتي تكون قاصرة فقط على دراسة نمو النباتات في مجموعات،تحت ظروف الحقل، مثل، معدل نمو المحصول، دليل مساحة الأوراق وفترة بقاء مساحة الأوراق (على أساس دليل مساحة الأوراق)، وهناك بعض القياسات المشتركة عند

تحليل نمو النباتات الفردية، والمجموعات أو العشائر النباتية، والمثال على ذلك المعدل المطلق والمعدل النسبي للنمو وصافي معدل التمثيل الضوئي .
ويمكن من نتائج الوزن الجاف للنبات ككل، أو لأعضائه المختلفة تقدير شواهد النمو الآتية:

أولا- معدلات تغير بسيطة: وهذه تشمل قيمة متغير واحد مع الزمن ومنها:

١- المعدل المطلق للنمو Absolute Growth Rate
٢- المعدل النسبي للنمو Relative Growth Rate
٣- معدل نمو المحصول Crop Growth Rate
٤-دليل مساحة الأوراق وفترة بقاء السطح الورقي

ثانيا- معدلات تغير مركبة: وهذه تشمل أكثر من متغير معا ومنها:

صافي معدل التمثيل الضوئي Net Assimilation Rate

وسوف نوضح فيما يلي طرق قياس شواهد النمو السابقة الذكر، والتي يجب دراستها عند تحليل نمو نباتات محاصيل الحقل، سواء على أساس النباتات الفردية أو على أساس مجموعات أو عشائر نباتية.

١- المعدل المطلق والمعدل النسبي للنمو

لتوضيح الفرق بين المعدل المطلق والمعدل النسبي للنمو نذكر المثال الآتي:

أجريت تجربة على نباتين، وكان وزن النبات الأول في بداية التجربة ١٠ جرام، وكان وزن النبات الثاني يساوي ١٠٠جرام، وبعد أسبوع من بداية التجربة، وجد أن وزن كلا من النباتين قد زاد بمقدار ١٠ جرام(جدول ٤-١). وهنا نتساءل أي النباتين قد نما أسرع من الثاني؟. للإجابة على هذا السؤال، فإن البعض يرى أن النباتين كانا متماثلين في سرعة نموهما، حيث أن وزنهما قد زاد بنفس المقدار وهو ١٠جرام، خلال نفس الفترة من الزمن (أسبوع)، ولكن وجهة النظر هذه لم تكن مقبولة لدى العديد من العلماء، وذلك لأن الوزن الأصلي (في بداية الفترة للنباتين كان غير متماثل)، ولذلك فإن نمو النبات الأقل وزنا (١٠جرام) والذي ضاعف وزنه كان أسرع من مثيله في النبات الأثقل وزنا (١٠٠ جرام)، والذي زاد وزنه بمقدار ١٠% فقط. ويتضح من هذا المثال، أنه إذا استمر نمو النباتين بنفس المعدل في الأسابيع التالية، فإنه بعد فترة معينة من النمو يتساوى وزن كلا من النباتين، ومن ذلك يتضح أيضا

أن، الزيادة المطلقة في الوزن خلال فترة معينة، لا تعبر تعبيرا صادقا عن سرعة نمو النباتات المختلفة، ولذلك فقد رؤي أنه من الضروري إستخدام قياسات أخرى للنمو، تأخذ في الإعتبار الإختلاف في الوزن الأصلي للنبات، حتى يمكن الحصول على قيمة حقيقية لمعدل نمو النباتات المختلفة، وأهم هذه القياسات هي المعدل النسبي للنمو.

جدول (٤-١). المعدل المطلق والمعدل النسبي للنمو لنباتين مختلفين في الوزن.

مقدار	النبات الأول	النبات الثاني
الوزن في بداية الفترة (و١)	١٠	١٠٠
الوزن في نهاية الفترة (و٢)	٢٠	١١٠
مقدار الزيادة في الوزن	١٠	١٠
ز٢ – ز١ (أسبوع)	١	١
المعدل المطلق للنمو (جرام/ أسبوع)	١٠	١٠
لوهـ و٢ - لوهـ و١	٢.٩٩-٢.٣٠	٤.٧٠-٤.٦٠
المعدل النسبي للنمو (جرام/ جرام/ أسبوع)	٠.٦٩	٠.١٠

(عن جاردنر وآخرون، ١٩٨٥)

ويعرف المعدل المطلق للنمو بأنه عبارة عن، مقدار الزيادة في وزن النبات خلال فترة زمنية معينة ويعبر عنه بـ "جرام/ أسبوع"، ويحسب من المعادلة الآتية:

المعدل المطلق للنمو = (و٢ – و١) / (ز٢ – ز١) = $\frac{W_2 - w_1}{T_2 - T_1}$

حيث أن:

و١ (W_1) = الوزن في بداية الفترة (ز١ T_1)

و٢ (W_2) = الوزن في نهاية الفترة (ز٢ T_2)

لقد سبق أن رأينا، أن المعدل المطلق للنمو في المثال السابق كانت متساوية في كلا النباتين (١٠ جرام/ أسبوع)، على الرغم من إختلاف النباتين عن بعضهما في الوزن عند بداية التجربة ولهذا فإن المعدل المطلق للنمو يعتبر مقياسا غير كافيا عند الأخذ في الإعتبارالإختلافات الكبيرة بين النباتات في الوزن عند بداية ونهاية التجربة. ولهذا فإن المعدل النسبي للنمو يفي بهذا الغرض.

ويعرف المعدل النسبي للنمو بأنه عبارة عن، الزيادة في المادة الجافى للنباتات في فترة زمنية بالنسبة للوزن في بداية هذه الفترة. ويحسب من المعادلة:

$$\text{المعدل النسبي للنمو} = \frac{\text{لوهـ و}_{٢} - \text{لوهـ و}_{١}}{\text{ز}_{٢} - \text{ز}_{١}} = \frac{\text{Log}_e\ W_2 - \text{Log}_e W_1}{T_2 - T_1}$$

حيث أن:
و١ (W_1) = الوزن في بداية الفترة (ز١ T_1)
و٢ (W_2) = الوزن في نهاية الفترة (ز٢ T_2)
لوهـ (Log_e) = لوغريتم ناباريان = ٢.٣٠٣ × لو.١٠

ويعبر عن المعدل النسبي للنمو: جرام/ جرام/ أسبوع، أو جرام/ جرام/ يوم، أو ملليجرام/ جرام/ أسبوع، وذلك على حسب الدقة المطلوبة، وتستخدم الوحدات الأخيرة عندما تكون الدقة مطلوبة بدون كسور عشرية. وفي المثال السابق (جدول ٤-١) فإن المعدل النسبي للنمو للنبات الأول الذي كان وزنه ١٠ جرام هو ٠.٦٩ جرام/ جرام/ أسبوع، وكان لمثيله الذي كان وزنه ١٠٠جرام هو ٠.١٠ جرام/ جرام/ أسبوع. من ذلك يتضح أن، معدل النمو النسبي يعطي قيمة حقيقية للمعدل النسبي للنمو في النباتات المختلفة.

ويتأثر المعدل النسبي لنمو النباتات المختلفة بالظروف البيئية، ومنها الإضاءة، الرطوبة الأرضية، محتوى التربة من العناصر الغذائية، تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون بالجو المحيط بالنباتات وكذلك تفاعل هذه العوامل مع بعضها البعض.

كما تختلف الأنواع النباتية المختلفة في متوسط المعدل النسبي للنمو، ولقد أجرى جريم Grime وهنت Hunt عام ١٩٧٥م، تجربة على ١٤٤ نوعا نباتيا، وقد تم تحليل نموها خلال فترة قدرها خمسة أسابيع بعد الإنبات، ولقد وجد أن المعدل النسبي للنمو يتراوح بين ٠.٢٢ – ٢.٧٠ جرام/ جرام/ أسبوع للأنواع النباتية المختلفة.

ويمكن حساب المعدل النسبي للنمو لأي عضو من أعضاء النبات، مثل الأوراق أو الجذور وزنا أو حجما أو طولا طبقا للمعادلة السابقة.

٢- معدل نمو المحصول Crop Growth Rate (CGR)

يعتبر معدل نمو المحصول من أهم قياسات تحليل النمو للنباتات المنزرعة تحت ظروف الحقل، ويعبر معدل نمو المحصول، عن مقدار الزيادة في وزن المادة الجافة للنباتات، لكل وحدة مساحة من الأرض، في وحدة زمنية معينة، ويعتبر معدل نمو المحصول، دليلا هاما للإنتاجية الزراعية، أو معدل إنتاج المادة الجافة.

ويعبر عن معدل نمو المحصول بـ: جرام مادة جافة/ متر مربع من الأرض/ يوم.

وإن معدل نمو المحصول خلال فترة معينة، في وحدة مساحة من الأرض يتوقف على كل من مساحة أوراق النباتات، وكفاءة هذه الأوراق في تكوين المادة الجافة. ولما كان، صافي معدل التمثيل الضوئي، عبارة عن معدل الزيادة في الوزن الجاف للنباتات، لكل وحدة مساحة من الأرض، فيمكن التعبير عن معدل نمو المحصول، طبقا للمعادلة الآتية:

معدل نمو المحصول = صافي معدل التمثيل الضوئي × دليل مساحة الأواق

$$CGR = NAR \times LAI$$

٣- فترة بقاء السطح الورقي Leaf Area Duration (LAD)

تدل فترة بقاء السطح الورقي على أهمية واستمرار مساحة السطح الورقي، قائما بوظيفته أثناء فترة نمو المحصول، كما تدل أيضا على كفاءة النباتات، على إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليها، والقدرة التمثيلية لنباتات المحصول خلال فترة زمنية معينة، إذ أن LAD تشمل كلا من مساحة السطح الورقي وكذلك طول فترة بقائه قائما بوظيفته. وأن متوسط فترة بقاء مساحة الأوراق خلال فترة زمنية معينة (ز٢ T_2، ز١ T_1)، يمكن أن يحسب بطريقتين هما:

١- على أساس مساحة الأوراق/ نبات (النباتات الفردية) Leaf area per plant، ويعبر عنه بـ: (مساحة × زمن)، وعلى سبيل المثال (م^2 × أسبوع)، وتحسب من المعادلة الآتية:

$$\text{فترة بقاء مساحة الأوراق (على أساس مساحة الأوراق)} = \frac{(\text{س}_٢ + \text{س}_١) \times (\text{ز}_٢ - \text{ز}_١)}{٢}$$

$$\text{Leaf area duration (Leaf area basis)} = \frac{(L_{A2} + L_{A1}) \times (T_2 - T_1)}{2}$$

حيث أن:

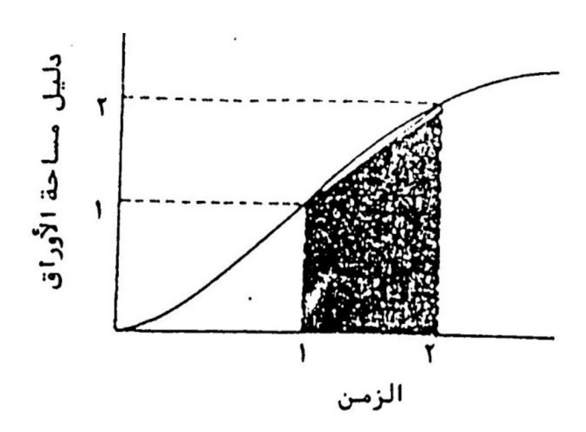
س١ (L_{A1}) = مساحة الأوراق في أول الفترة ز١ (T_1)،

س٢ (L_{A2}) = مساحة الأوراق في أول الفترة ز٢ (T_2)،

٢- يمكن تقدير فترة بقاء مساحة الأوراق على أساس مساحة الأوراق، عن طريق توقيع مساحة الأوراق للنبات، مقابل الزمن على رسم بياني، وتدل المساحة تحت المنحنى على LAD ويعبر عنها أيضا بـ: مساحة × زمن (م^2/ أسبوع).

أما في المحاصيل النامية تحت ظروف الحقل، فإن الإهتمام ينصب على العلاقة بين مساحة الأوراق، بالنسبة لمساحة سطح الأرض التي تشغلها النباتات (دليل مساحة الأوراق)، وبين فترة بقاء مساحة الأوراق. ويمكن تقدير فترة بقاء مساحة الأوراق عن طريق توقيع قيم دليل مساحة الأوراق مقابل الزمن على رسم بياني، كما هو مبين بشكل (٤-٤)، وتدل المساحة تحت المنحنى الناتج من علاقة دليل مساحة الأوراق، بوحدات الزمن (يوم أو أسبوع)، لأن LAI لا تميز.

ولقد وجد في ثلاثة محاصيل حقل هي، الشعير، والقمح، وبنجر السكر، أن متوسط صافي معدل التمثيل الضوئي، أثناء فترات النمو السريعة، كانت متشابهة لحد ما، بينما اختلفت فترة بقاء مساحة السطح الورقي لهذه المحاصيل (شكل ٤-٤)

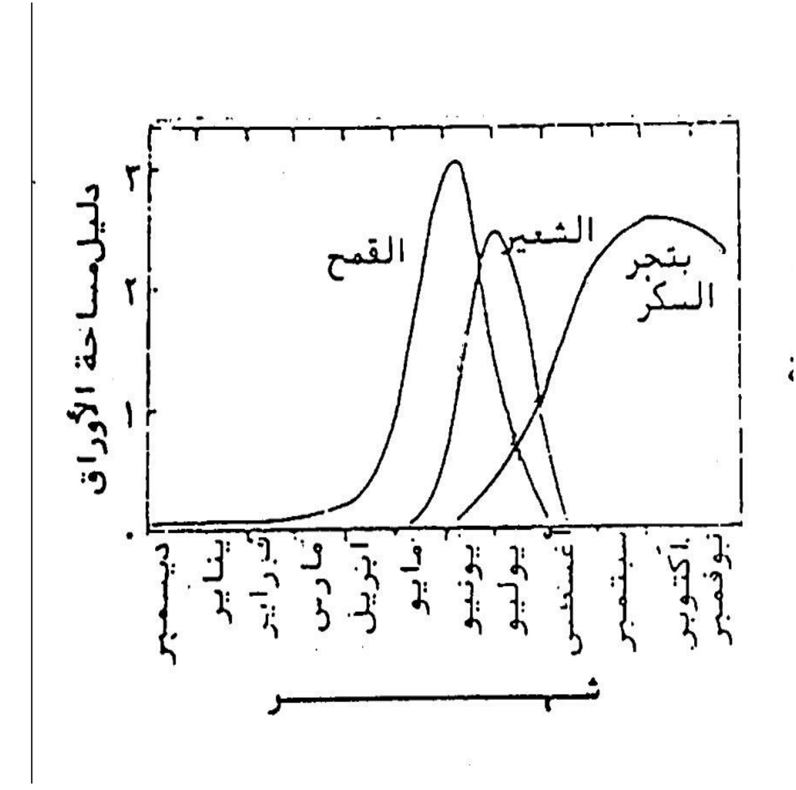


شكل (٤-٤). فترة بقاء مساحة السطح الورقي (المساحة المظللة)

ولقد وجد أن فترة بقاء مساحة الأوراق، كانت أهم من صافي معدل التمثيل الضوئي، في التنبؤ، بكمية المحصول النهائي في محصول الشعير، والقمح، وبنجر السكر، كما هو مبين بجدول (٤-٤).

علاقة فترة بقاء السطح الورقي بكمية المحصول

لقد وجد أن LAD (Leaf area duration)، يكون عادة مرتبطا إرتباطا وثيقا بكمية المحصول لأن زيادة LAD يعمل على إعتراض الأشعة الشمسية بواسطة الأوراق لفترة طويلة، وبالتالي إنتاج كمية أكبرمن المادة الجافة بواسطة التمثيل الضوئي. ولقد وجد أن الإختلافات الكبيرة في كمية محصول بعض المحاصيل ترجع أساسا إلى الإختلافات في LAD. وحيث أن LAD ترتبط بمحصول المادة الجافة، فإنها يمكن أن تعطي دلالة على إنتاجية المحصول المنزرع. ولقد وجد أن LAD تعطي مقياسا صادقا لمحصول الحبوب في القمح إذا قيست في الفترة من بداية ظهور النورة حتى النضج، ويرجع ذلك إلى أن معظم المواد الكربوهيدراتية التي تخزن في حبوب القمح، تأتي من التمثيل الضوئي بعد تكشف السنبلة. ولقد أظهرت الدراسات التي قام بها Evans وآخرون عام ١٩٧٥م، أن LAD يمكن أن يكون مسؤلا عن حوالي نصف التباين في محصول الحبوب في القمح، حتى في وجود إختلافات كبيرة في الظروف المناخية، والعمليات الزراعية ، والأصناف.



شكل (٤-٩). التغير في دليل مساحة الأوراق مع الزمن. المساحة تحت كل منحنى تمثل فترة بقاء السطح الورقي

ثانيا- صافي معدل التمثيل الضوئي Net Assimilation Rate (NAR)

عند تقدير المعدل النسبي للنمو، فقد اعتبر أن وزن كل أجزاء النبات متساوية في قدرتها على إنتاج مادة جافة جديدة، ولكن من المعروف أنه مع نمو النباتات وتقدمها في العمر، تزداد نسبة المواد الناتجة من التمثيل الضوئي، التي تدخل في بناء جسم النبات، وهذه المواد لا تساهم في النمو، ولذلك فإنه بتقدم النمو، فإن وزن الجزء من النبات الذي يساهم في إنتاج مادة جافة (الأوراق) يقل. ونتيجة لذلك فإن معدل النمو يقل بتقدم النباتات في العمر كما هو مبين بجدول (٤-٢). ولذلك فقد رأى البعض، أنه من الضروري إيجاد دليل (مقياس) ثابت نسبيا للنمو أو دليلا على كفاءة إنتاج المادة الجافة، ويكون مستقلا عن الحجم الكلي للنبات، بينما يكون مرتبطا بمكون أو بجزء من النبات واضح المعالم والسلوك، وذو كفاءة ووظيفة ثابتة بالنبات. ومن المعروف أن الأوراق هي الجزء من النبات الذي يستقبل الأشعة الشمسية الساقطة على

النبات، وبذلك فإنها تمثل حجم جهاز التمثيل الضوئي للنبات تقريبا، كما أن معظم المادة الجافة المتكونة بالنبات، عبارة عن ناتجات تمثيل ضوئي، ولذلك فقد اقترح Gregory عام ١٩٢٦م، أن صافي الزيادة في وزن النبات لكل وحدة مساحة من السطح الورقي في وحدة الزمن قد تكون دليلا أو مقياسا ذو أهمية ودلالة أكبر لنمو النباتات. ولقد أطلق عليه جريجوري بـ"صافي معدل التمثيل الضوئي Net Assimilation Rate"، وتختصر إلى NAR، فإذا عرفت مساحة الأوراق وكذلك التغير في في وزن النبات، خلال فترة محددة فإنه يمكن تقدير كفاءة هذه الأوراق في التمثيل الضوئي، كما يمكن معرفة مقدار المادة الجافة، التي تكونت لكل وحدة مساحة من السطح لورقي خلال تلك الفترة، وبذلك يمكن الحكم على المعاملات، التي تؤدي إلى زيادة أو نقص فاعلية الأوراق في تكوين المادة الجافة، وكذلك يمكن الحكم على مدى تغير هذه الفعالية مع الوقت، أثناء نمو النبات، ويعتبر هذا مقياسا لفعالية الأوراق في تكوين المادة الجافة.

ويعرف صافي معدل التمثيل الضوئي، على أساس مساحة الأوراق بأنه، عبارة عن مقدار الزيادة في المادة الجافة، لكل وحدة مساحة من السطح الورقي في وحدة الزمن، ويقدر من المعادلة الآتية (عن واتسون Watson عام ١٩٥٨م):

$$\text{صافي معدل التمثيل الضوئي (على أساس مساحة الأوراق)} = \frac{و_٢ - و_١}{س_٢ - س_١} \times \frac{لو_هـ س_٢ - لو_هـ س_١}{ز_٢ - ز_١}$$

$$NAR \text{ (on LA basis)} = \frac{W_2 - W_1}{LA_2 - LA_1} \times \frac{Log_e\, LA_2 - Log_e\, LA_1}{T_2 - T_1}$$

حيث أن:

و١ (W_1) = الوزن الكلي الجاف للنبات في أول الفترة ز١ (T_1)،

و٢ (W_2) = الوزن الكلي الجاف للنبات في نهاية الفترة ز٢ (T_2)،

س١ (LA_1) = مساحة السطح الورقي في أول الفترة ز١ (T_1)،

س٢ (LA_2) = مساحة السطح الورقي في نهاية الفترة ز٢ (T_2)،

لوهـ (Log_e) = لوغاريتم ناباريان = ٢.٣٠٣ لو١٠ .

ويعبر عن صافي معدل التمثيل الضوئي، على أساس مساحة الأوراق بـ: جرام مادة جافة/ سم٢ من مساحة الأوراق/ أسبوع، ويرمز لها E_A.

ويمكن تقدير صافي معدل التمثيل الضوئي، على أساس وزن الأوراق، ويعبر عنها في هذه الحالة بـ: جرام مادة جافة/ جرام من الأوراق/ أسبوع، ويرمز لها بالرمز (E_W). كما يقدر صافي التمثيل الضوئي على أساس نسبة البروتين بالأوراق، ويرمز لها بالرمز (E_P)، كما يمكن تقدير صافي معدل التمثيل الضوئي على أساس المحتوى الكلي للكلوروفيل بالنبات، والذي يمثل حجم جهاز التمثيل الضوئي للنبات، ويعتبر هذا المقياس لصافي التمثيل الضوئي المحسوب بهذه الطريقة بـ E_C، ولقد وجد أن القياسات المختلفة لصافي معدل التمثيل الضوئي، تعطي قيما مختلفة.

إن تظليل الأوراق بعضها لبعض، وتقدم الأوراق في العمر، يعملان على نقص قيمة NAR نتيجة لنقص معدلات التمثيل الضوئي، بينما تستمر عملية التنفس طالما ظلت الأوراق حية، ويبين جدول (٤-٢) معدلات التمثيل الضوئي والتنفس، وعلاقتها بقيمة NAR للورقة الواحدة، ولكل الأوراق على نباتين أحدهما حديث العمر يحمل أربعة أوراق، والآخر متقدم في العمر نسبيا ويحمل سبعة أوراق.

ويتضح من جدول (٤-٢) أن:

١- التمثيل الضوئي الكلي في أوراق النبات المتقدم في العمر أعلى (٣٢)، عن النبات الحديث العمر (٣١)، ولكن التنفس الكلي في النبات المتقدم العمر مرتفع أيضا (١٣)، ولذلك فإن قيمة NAR هي ٢١ للنبات متقدم العمر، بينما هي ٢٤ في النبات حديث العمر.

٢- أن تقدم الأوراق في العمر وتظليل بعضها البعض، قد يؤدي إلى قيمة سالبة لصافي التمثيل الضوئي، ونقص المحصول، ولتجنب ذلك يجب على منتج المحصول أن يعمل جاهدا على زراعة محصوله بالكثافات النباتية المثلى.

٣- أن قيمة صافي معدل التمثيل الضوئي للورقة رقم ٥ في النبات الثاني (متقدم العمر)، مساوية للصفر، وتعتبر عند نقطة التعويض (المواد الناتجة من التمثيل الضوئي تساوي المواد المستهلكة في التنفس)، أما الورقة السادسة والسابعة على نفس النبات ذات معدل تمثيل ضوئي أقل من الصفر، ولذلك فإنهما يعتبران أوراقا متطفلة Parasitic على النبات، لأن هذه الأوراق السفلى على النبات، تستهلك مواد ممثلة بكمية أعلى من المواد الغذائية التي تقوم بتمثيلها.

جدول (٤-٢). العلاقة بين عمر الورقة، وصافي معدل التمثيل الضوئي في نباتين، أحدهما حديث العمر والآخر متقدم العمر مأخوذة من عشيرة نباتية نامية تحت ظروف الحقل.

النبات	رقم الورقة	معدل التمثيل الضوئي	معدل التنفس	صافي معدل التمثيل الضوئي
نبات حديث العمر (٤ أوراق)	١	١٢	٢	١٠
	٢	١٠	٢	٨
	٣	٧	٢	٥
	٤	٢	٢	١
المجموع		٣١	٨	٢٤
نبات متقدم العمر (٧ أوراق)	١	١٢	٢	١٠
	٢	١٠	٢	٨
	٣	٧	٢	٥
	٤	٣	٢	١
	٥	٢	٢	٠
	٦	٠	٢	٢-
	٧	٠	١	١-
المجموع		٣٢	١٣	٢١

٤- إذا كان صافي معدل التمثيل الضوئي للورقة رقم ٥،٦،٧ يساوي صفر، أو أقل من الصفر بسبب تظليل الأوراق بعضها لبعض فقط، فإن تقليل كثافة النباتات يكون فعالا في معالجة هذا النقص في صافي التمثيل الضوئي، أما إذا كان النقص في صافي التمثيل الضوئي، راجع إلى شيخوخة الأوراق، فإن العمل على دفع النباتات إلى تكوين أوراقا جديدة، يكون فعالا في معالجة هذا النقص في صافي التمثيل الضوئي في مثل هذه الحالة.

لقد وجد Grim و Hunt عام ١٩٧٥م، أن صافي معدل التمثيل الضوئي يتراوح بين ١٩.٧ جم/ م^{٢}/ أسبوع في بعض الأنواع النباتية إلى ١٩٢ جم/ م^{٢}/ أسبوع في أنواع نباتية أخرى، ولقد وجد بوجه عام، أن النباتات العشبية تتميز بصافي معدل تمثيل ضوئي مرتفع مقارنة بالأشجار الخشبية.

الباب الخامس

إنتقال وتوزيع نواتج التمثيل الضوئي بالنبات

لقد سبق أن أوضحنا في الباب الثاني والثالث عملية التمثيل الضوئي وكفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الضوئية الساقطة عليه، وتكوين المادة الجافة في نباتات محاصيل الحقل، ولكي يستفيد النبات من الأشعة الضوئية الساقطة عليه بكفاءة عالية في عملية التمثيل الضوئي وانتاج المادة الجافة والمحصول، فيلزم نقل ناتجات التمثيل الضوئي من أماكن تكوينها بالخلايا الممثلة للضوء والتي تحتوي على كلوروبلاستيدات إلى الأعضاء الأخرى الغير خضراء (الغير ممثلة للضوء) بالنبات، حيث تستخدم في نموها وتكشفها، أو تتجمع بها كناتجات تخزين.

ومن هنا تظهر حاجة النبات إلى نظام (جهاز) لنقل أو إنتقال ناتجات التمثيل الضوئي من أماكن تكوينها وتوزيعها على الأعضاء الأخرى من النبات، وخصوصا الخلايا الغير خضراء، والتي تعتمد على الخلايا الخضراء في إمدادها بالغذاء اللازم لنموها ونشاطها.

إن حركة أي مادة مذابة من أي جزء بالنبات إلى جزء آخر يطلق عليها إنتقال Translocation وبالنسبة لإنتقال الذائبات لمسافات قصيرة والتي يمكن ملاحظتها مجهريا، يكون عن طريق الإنتشار البسيط Simple diffusion من خلية لأخرى، ولكن حركة الذائبات بهذه الطريقة بطئ جدا، بدرجة لا تكفي لنقل الذائبات من الأوراق إلى الجذور، أو من الأوراق إلى مناطق النمو بالجذور أو السيقان، والتي تبعد عن بعضها مسافات طويلة. إن مثل هذا النقل للذائبات عبر مسافات طويلة يتم بكفاءة عالية عن طريق أنسجة موصلة على درجة عالية من التخصص، هي الخشب واللحاء، والتي تتميز بصفات تشريحية خاصة تمكنها من القيام بوظيفة الإنتقال الطولي السريع للذائبات دون غيرها من الأنسجة، إذ أن كلاهما يتميز بوجود خلايا طويلة وعناصر أخرى متصلة بعضها ببعض بطريقة تؤدي إلى تكوين شبه قنوات مستمرة.

وأثناء نمو النباتات فإن المواد الغذائية تنتقل من المنبع (أماكن تكوينها) إلى المصب، حيث تستعمل في تكوين ونمو الخلايا الجديدة في مناطق النمو، أو تخزن فيها.

ويقوم نسيج اللحاء بنقل ناتجات التمثيل الضوئي، التي تتكون في الورقة والأجزاء الخضراء الأخرى على النبات في إتجاهين، فقد يكون الإنتقال من أعلى إلى أسفل Bassipetal، أو من أسفل إلى أعلى Acropetal، وقديتم الإنتقال في الإتجاهين المتضادين في وقت واحد، في ساق النبات الواحد. فعندما تصل ناتجات التمثيل الضوئي من الورقة إلى الساق، فإنها قد تنتقل إلى أعلى أو إلى أسفل، أو في كلا الإتجاهين. وسوف نوضح فيما يلي تنظيم إتجاه نقل نواتج التمثيل الضوئي باللحاء أثناء أطوار النمو المختلفة من حياة النبات.

نظام نقل نواتج التمثيل الضوئي باللحاء

يمكن وصف إنتقال نواتج التمثيل في اللحاء، بأنه نقل موجه من المصدر (المنبع) إلى مناطق الإستهلاك، أي من مناطق الإنتاج الأولية إلى مناطق النمو أو التخزين، إذ وجد أنه لا يتم نقل المواد الغذائية إلى ورقة ناضجة مظللة، والتي لا تستطيع القيام بالتمثيل الضوئي بمعدل كاف، ولمواجهة متطلباتها للجزيئات العضوية العالية الطاقة، فمن المتوقع أن مثل هذه الورقة تعمل كمستهلك، ولكنها في الحقيقة تجوع حتى الموت غالبا.

وعند أخذ نبات حولي كمثال لتوضيح إتجاه إنتقال الذائبات العضوية عبر اللحاء يكون متغيرا ويختلف لحد ما باختلاف طور نمو النبات كالآتي:

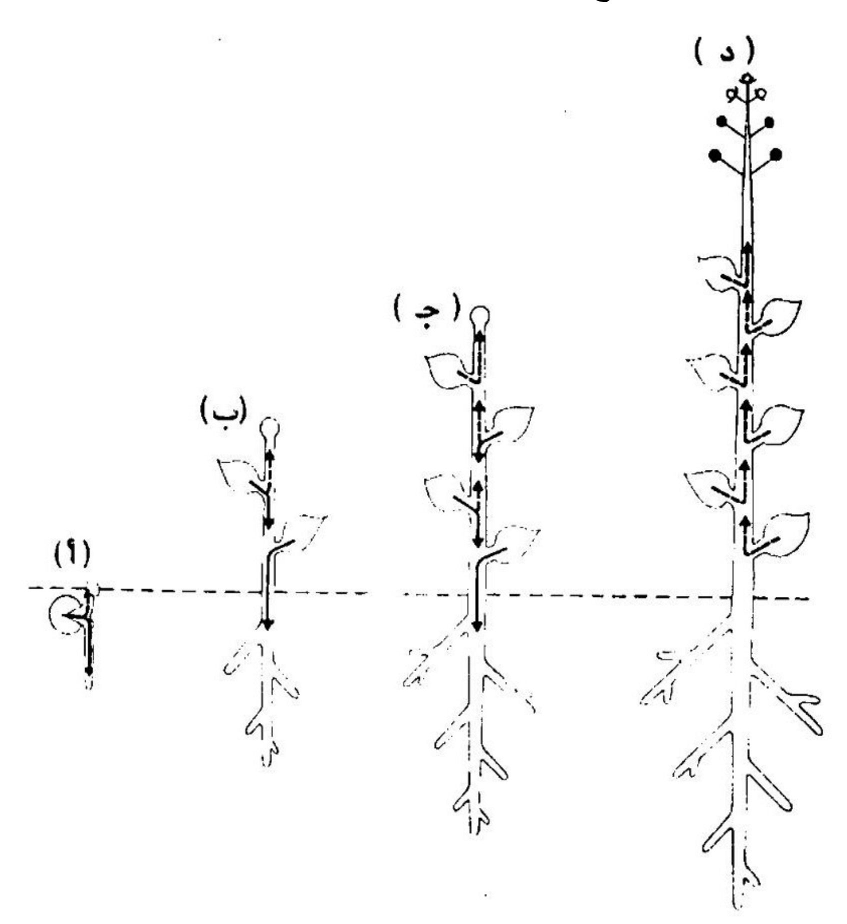
أ- في مرحلة البادرات، تنتقل معظم نواتج التمثيل الضوئي من الأوراق تامة التكوين، إلى أسفل، حيث يوجد المجموع الجذري السريع النمو في هذا الطور من النمو، كما أن بعض نواتج التمثيل الضوئي تنتقل إلى أعلى حيث القمة النامية للساق والأوراق الحديثة في مرحلة التكوين والنمو.

ب-وبتقدم النباتات في العمر، وازدياد حجمها (مرحلة النمو الخضري)، فإن نواتج التمثيل الضوئي للأوراق العليا الناضجة على النبات، ترحل أساسا إلى كل من الأوراق التي توجد أعلى منها مباشرة، والتي مازالت في مرحلة التكشف والتكوين، وكذلك إلى القمة النامية للساق، أما الأوراق السفلى على النبات، فإن نواتج تمثيلها ترحل أساسا إلى الجذور. أما الأوراق التي توجد على الساق في وسط النبات، فإن نواتج تمثيلها ترحل إلى الجذور، وكذلك إلى القمة النامية للساق (شكل (٥-١).

جـ- وعندما تصل النباتات إلى مرحلة النمو الزهري والثمري، فإن نواتج التمثيل الضوئي للأوراق تتجه كلها إلى أعلى تقريبا، حيث تستعمل في تكوين الأزهار والثمار.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن نسيج الخشب يقوم بنقل الماء والذائبات الغير عضوية في اتجاه واحد فقط هو من أسفل إلى أعلى، أي من الجذر إلى الساق.

وفي مرحلة الإزهار والإثمار، يعاد نقل العناصر المعدنية (التي تتحرك داخل النبات) ثانية من الأوراق المسنة إلى الأوراق الحديثة السن أو إلى الجذور. عن طريق نسيج اللحاء.



شكل (٥-١). رسم تخطيطي يبين التغير في نظام نقل الذائبات عبر اللحاء أثناء أطوار النمو المختلفة لنبات حولي.

أ- طور إنبات البذور، ب- طور البادرة، جـ- طور النمو الخضري، د- طور الإزهار والإثمار.

ونظرا لوجود اللحاء في حزم جانبية في الساق، وأن عناصر الأنابيب الغربالية تقوم بنقل الغذاء في الإتجاه الرأسي (في إتجاه المحور الطولي للساق أساسا)، فإن الأوراق الموجودة على أحد جوانب الساق، تكون أكثر كفاءة في ترحيل نواتج تمثيلها الضوئي إلى الأوراق الحديثة الموجودة على نفس الجانب. وعلى سبيل المثال، وجد أن الأوراق العليا الحديثة لنباتات فول الصويا، تستقبل من الورقة التي توجد أسفل منها مباشرة (الأكبر سنا) والتي توجد على نفس الجانب من الساق مواد ممثلة أكثر من الأوراق الموجودة على الجانب المقابل.

ولقد وجد أن بعض النباتات تمتلك نظاما وعائيا متشابكا، وهذا يسمح بالنقل الجانبي للمواد الغذائية. ولقد وجد أن الماء والذائبات العضوية تنتقل جانبيا من نسيج اللحاء إلى نسيج الخشب في سيقان كثير من النباتات خلال الأشعة اللحائية Vascular ray أساسا.

ويعتبر النقل الجانبي (المستعرض) هاما، إذ أنه يعمل على إنتقال المواد الغذائية من الأنابيب الغربالية إلى خلايا الكامبيوم وخلايا الخشب كما أنها تساعد على إنتقال الغذاء إلى خلايا الإختزان للخشب واللحاء.

عموما- توجد الآن بعض الأدلة على وجود علاقة بين تركيز الأكسين بالعضو النباتي، وقدرته على جذب إنتقال المواد الغذائية نحوه، إذ وجد أن النقل يجري نحو المناطق ذات التركيز العالي من الأكسين، كما سوف يأتي ذكره فيما بعد.

المواد التي تنتقل عبر اللحاء

إن معظم المواد التي تنتقل عبر اللحاء(خلاف الماء) هي نواتج التمثيل الضوئي، أو نواتج تحلل المواد الغذائية المخزنة بأعضاء التخزين المختلفة.

ولقد وجد أن حوالي ٩٠% من المواد الصلبة الموجودة في اللحاء عبارة عن المواد الكربوهيدراتية، بعضها سكريات غير مختزلة مثل السكروز، والرافينوز وهذه السكريات توجد في عصارة اللحاء بتركيز مرتفع نسبيا، يتراوح بين ١٠-٢٥%. ولقد وجد أن السكروز هو السكر السائد الذي ينتقل في اللحاء لمعظم نباتات المحاصيل.

وتحتوي عصارة اللحاء أيضا على مواد نيتروجينية، وخصوصا الأحماض الأمينية، والأميدات وغيرها بتركيزات تتراوح بين ٠.٠٥-٠.٤%.

ولقد وجد أن الأحماض الأمينية والأميدات، تنتقل من الأوراق المسنة التي تصل إلى طور الشيخوخة إلى الأعضاء الحديثة على النبات، مثل القمم النامية والأوراق حديثة التكوين.

وتوجد كميات قليلة جدا من مواد أخرى تنتقل في اللحاء، وهذه المواد تشمل العديد من منظمات النمو، والمبيدات الحشرية الجهازية.

معدل انتقال الذائبات خلال اللحاء

يتأثر معدل إنتقال الذائبات خلال اللحاء بواسطة العديد من العوامل أهمها، المعدل الذي تنتقل به الذائبات من الأنابيب الغربالية إلى المصب، والتركيب الكيماوي للمركب الذي ينتقل خلال اللحاء، والمعدل الذي تنتقل به الذائبات من المنبع إلى عناصر الأنابيب الغربالية.

ولقد وجد أن سرعة إنتقال نواتج التمثيل الضوئي ككل خلال اللحاء تتراوح عادة بين ٣٠-٥٠سم/ ساعة.

وبالنسبة للمحصول، فإن سرعة الإنتقال تعتبر أقل أهمية من Specific mass transfer (SMT). وهي عبارة عن وزن نواتج التمثيل الضوئي المنتقلة لكل وحدة مساحة من المقطع العرضي من اللحاء لكل وحدة زمنية.

ولقد وجد أن SMT كانت متشابهة لحد كبير في بضع أنواع نباتية، إذ تراوحت بين ٣-٥ جرام/ سم^{٢}/ ساعة.

ومن ذلك يتضح أن مساحة المقطع العرضي للحاء قد تحدد معدل الإنتقال. وأن مساحة المقطع العرضي للحاء الموجود بحامل السنبلة Peduncle في الأقماح المنتجة جديثا، أكبر من مثيلتها في آبائها، وترتبط مساحة المقطع العرضي الكبير للحاء بمعدلات الإنتقال العالية (Evans, *et.al.* 1970).

عموما- توجد إختلافات في معدلات الأنتقال بين الأنواع النباتية المختلفة وخصوصا بين النباتات الرباعية الكربون والنباتات الثلاثية الكربون، إذ أن أوراق النباتات رباعية الكربون، تكون ذات معدل أعلى لتبادل غاز CO_2، والنسبة بين مساحة المقطع العرضي للحاء إلى مساحة السطح الورقي أعلى، ومعدلات إنتقال أعلى عن النباتات ثلاثية الكربون.

إن زيادة كفاءة النباتات رباعية الكربون في ترحيل نواتج تمثيلها الضوئي خارج الأوراق إلى اللحاء، قد يرجع إلى الصفات التشريحية الخاصة بها، حيث تحتوي خلايا غمد الحزمة على كلوروبلاستيدات، أو نتيجة المساحة الكبيرة للمقطع العرضي للحاء.

آلية (ميكانيكية) الإنتقال في اللحاء

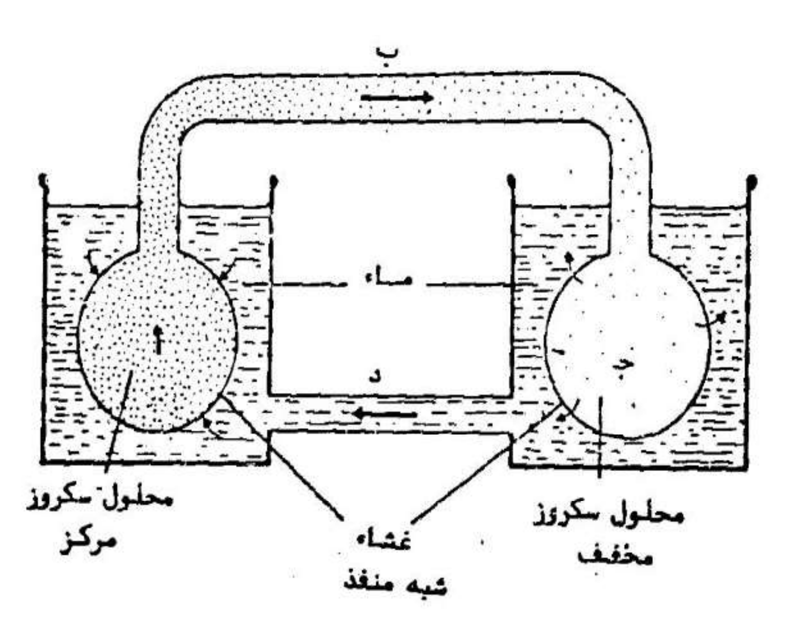
هناك إحتمالان لطريقة إنتقال (نقل) أي مادة في محلول ما، فهي إما أن تنتقل مع بعضها سويا بواسطة سريان (إنسياب) كتلي (إنسياب بمقادير كبيرة Bulk flow) للمحلول أي سريان المادة الذائبة (السكروز) والمذيب (الماء)، أو تتحرك بطريقة الإنتشار Diffusion وفي هذه الطريقة، تبقى المادة المذيبة ساكنة. وأن إنسياب الماء والذائبات الغير عضوية، من الجذر إلى الساق والأوراق، تمثل إنسياب كتلة المحلول بأكمله وأن قوة الحركة في هذه الحالة إما شد نتيجة لسحب النتح أو ضغط جذري.

وأن إنتقال الذائبات العضوية في اللحاء، يكون على عكس مثيله في نسيج الخشب، إذ أن المواد المنتقلة عن طريق الخشب، تأخذ طريقها خلال خلايا ميتة، وتحتاج عملية الإنتقال إلى الإختلافات في الجهد المائي فقط بين نهايتي النسيج الوعائي، بينما الإنتقال خلال اللحاء، يحتاج إلى خلايا حية نشطة، على طول النسيج الوعائي ومما يؤيد ذلك أنه وجد، أن الإنتقال خلال اللحاء لا يمكن أن يحدث عبر قطاع من الساق، تم قتله بواسطة الحراراة أو السموم، ويعتبر هذا دليلا على أن عملية النقل عبر اللحاء تتضمن عمليات أيضية.

وبالإضافة إلى ماسبق فقد وجد أن سرعة إنتقال السكروز في اللحاء أعلى بمقدار ٢٠٠٠٠-٤٠٠٠٠ مرة عنه في حالة الإنتشار البسيط.

ولقد وضعت عدة نظريات لتفسير ميكانيكية (آلية) نقل الذائبات العضوية عبر اللحاء، إلا أن أكثر هذه النظريات قبولا هي نظرية سريان (إنسياب) الكتلة Mass-flow theory والتي وضعها العالم الألماني مونش عام ١٩٣٠م.

وتفترض هذه النظرية أن المواد الغذائية الممثلة (نواتج التمثيل الضوئي) تنتقل عبر اللحاء في سريان (إنسياب أو تدفق) كتلي على امتدادا اللحاء، ناتج عن التدرج في الجهد الإسموزي بين خلايا اللحاء الموجودة في نهايتي الأنبوب الغربالي، أي بين المنبع والمصب.



شكل (٥-٣). رسم تخطيطي لنظام أسموزي ميكانيكي (غير حي) يوضح نظرية مونش Munch لسريان (إنسياب) الكتلة.

ويوضح شكل (٥-٣) نموزجا أسموزيا (ميكانيكي أو غير حي) يوضح نظرية مونش لسريان (إنسياب) الكتلة. ويتكون هذا النموزج من أزمومترين أ و جـ شبه منفذين (ينفذان الماء فقط). الأزمومتر (أ) يحتوي على محلول سكروز مركز، بينما يحتوي أزمو متر (جـ) على محلول سكروز مخفف، ويتصل أزمومتر (أ) و (جـ) ببعضهما بواسطة أنبوبة (ب)، وكل من ازمومتر (أ)، (جـ) مغمور في وعاء يحتوي على ماء مقطر، ويتصل هذان الوعاءان ببعضهما بقناة (د).

وحيث أن هذا النظام يعتبر نظاما مغلقا، وأن أغشية أزمومتر (أ)، (جـ) شبه منفذة، وأن تركيز السكروز في (أ)، (جـ) ليس متساويا، فإنه تنشأ أسموزية في كل من (أ)، (جـ)، ولكن إمتصاص الماء في (أ) يكون أسرع منه في (جـ) ولذلك يكون هناك سريان (إنسياب) كتلي لمحلول السكروز من (أ) إلى (جـ)، وذلك عن طريق الأنبوبة الموصلة بينهما (ب).

وأن الماء سوف ينساب خارج (حـ) إلى الماء الموجود في الوعاء المحيط. وحيث أن الوعاء الموجود به أزمومتر (جـ) يتصل بالوعاء الذي يوجد به أزمومتر (أ) الذي ينتقل إليه الماء. فيتولد نظاما دائريا ينساب فيه

الماء من أزمومتر (أ) إلى (جـ)، حاملا معه السكروز (إنتقال سلبي)، كما ينساب الماء من (جـ) بسبب الضغط المتولد، ويعود للدوران عن طريق القناة (د) التي توصل بين الوعائين (الموضوع بهما الأزمومترين)، وبذلك فستكون هناك دورة للماء حول هذا النظام، إلى أن يصبح تركيز السكروز في أزمومتر (أ) و (جـ) متساوي. ولذلك فإنه من الناحية النظرية، يمكن لهذه الدورة أن تستمر عن طريق، إما إضافة سكروز إلى أزمومتر (أ) أو إزالته بانتظام من أزمومتر (جـ).

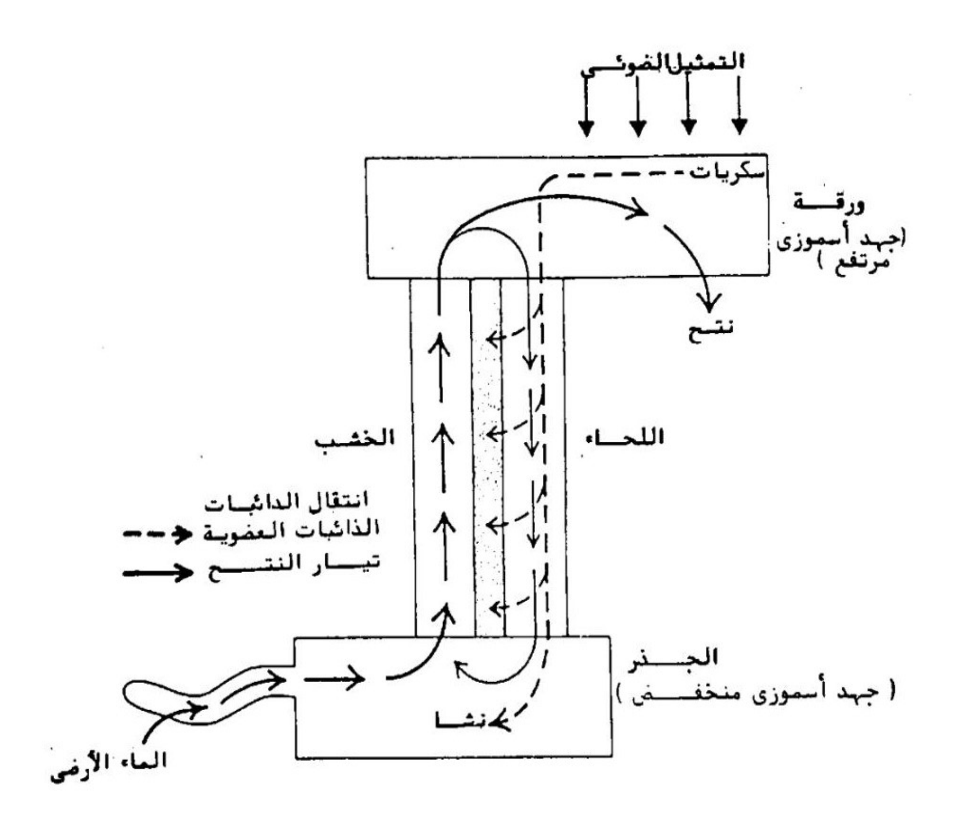
وإذا طبق هذا النظام على النبات الحي كما هو مبين بشكل (٥-٤) فإن الأوراق (المنبع أو المصدر) يمكن تمثيلها بأزمومتر (أ)، والجذور (المصب) بأزمومتر (جـ)، والأنابيب الغربالية، تمثل بأنبوبة التوصيل (ب)، وعصير الخشب يمثل بالماء في الوعائين الموجود فيهما (أ) و (جـ).

وفي الأوراق حيث تتم عملية التمثيل الضوئي، فإن السكروز ينتقل إلى الأنابيب الغربالية، بواسطة عملية أيضية حيوية يطلق عليها عملية شحن أو تحميل اللحاء، وأن تراكم السكريات في الأنابيب الغربالية يعمل على نقص الجهد المائي في الأنابيب الغربالية، فينتقل الماء من الخلايا المجاورة ومن نسيج الخشب وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة الضغط الهيدروستاتيكي مسببا السريان (الإنسياب) الكتلي للماء حاملا معه نواتج التمثيل الضوئي إلى مناطق ذات ضغط إمتلائي أقل، وهكذا.

وعند الجذر (المصب) ينتقل السكروز من الأنابيب الغربالية إلى الجذر عن طريق عملية أيضية، يطلق عليها تفريغ اللحاء، وهذه السكريات تستخدم في الجذر في عمليات النمو أو التخزين، وينتج عن هذ العملية زيادة الجهد المائي في الأنابيب الغربالية، ولذلك فإن الماء ينتقل من الأنابيب الغربالية إلى الخلايا المجاورة والخشب، وهذا يؤدي إلى نقص الضغط الهيدروستاتيكي في الأنابيب الغربالية، والذي يؤدي بدوره إلى نشوء إنحدار تدرج ضد ضغط الإمتلاء Turger pressure gradient بين المنبع والمصب، وهذا يؤدي إلى حركة الماء والذائبات من الجذر إلى الساق في نظام دائري مماثلا للنموزج الميكانيكي (الغير حي) الذي يوضح نظرية مونش لسريان (إنسياب) الكتلة.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن حركة السكريات من خلايا الورقة إلى الأنابيب الغربالية، قد تحدث ضد منحدر تدرج التركيز ولذلك، فإن نظرية سريان (إنسياب) الكتلة، تنطبق على سريان الذائبات داخل اللحاء فقط على طول خط تدرج الضغط الإمتلائي من الورقة (المنبع) إلى الجذور والأعضاء الأخرى

(المصب)، ولكن تحتاج عملية إنتقال نواتج التمثيل الضوئي من الورقة (المنبع) إلى الأنابيب الغربالية، وأيضا من الأنابيب الغربالية إلى الجذر (المصب) إلى طاقة، وسوف نوضح ذلك فيما يلي بمشيئة الله.



شكل (٥-٤). رسم تخطيطي يوضح تطبيق نظرية مونش لسريان (إنسياب) الكتلة على النبات الحي (عن Loveless، ١٩٨٣).

تحميل وتفريغ اللحاء Phloem loading and unloading

إن حركة السكريات من خلايا الورقة (المنبع أو المصب) إلى الأنابيب الغربالية، قد تحدث ضد إنحدار تدرج التركيز، كما سبق أن ذكرنا، وبمعنى آخر أن حركة نواتج التمثيل الضوئي من خلايا الورقة إلى داخل الأنابيب الغربالية باللحاء، تعتبر عملية نشطة، وتحتاج إلى طاقة، ويطلق عليها تحميل أو شحن اللحاء Phloem loading.

وعند إنتقال الذائبات العضوية خلال عناصر الأنابيب الغربالية، ووصولها إلى المصب (مثل الجذر) قد يكون إنتقال الذائبات العضوية إلى

الجذر ضد منحدر التركيز، وتحتاج عملية الإنتقال هذه إلى طاقة، ويطلق على عملية النقل هذه "تفريغ اللحاء Phloem unloading".

مما سبق يتضح أن عملية تحميل وتفريغ اللحاء عملية أيضية نشطة تحتاج إلى طاقة، وتقوم الخلايا المرافقة للأنابيب الغربالية بإمداد هذه الأنابيب الغربالية بالطاقة اللازمة لعمليتي تحميل وتفريغ اللحاء.

إن زيادة معدل إنتقال نواتج التمثيل الضوئي من الورقة إلى الأعضاء الأخرى في النباتات رباعية الكربون بالمقارنة بالنباتات ثلاثية الكربون، كما سبق أن ذكرنا في الباب الثاني، قد يرجع إلى وجود خلايا غمد الحزمة التي تحتوي على كلوروبلاستيدات، وتحيط بالحزم الوعائية في الورقة (شكل ٢-٧)، ونظرا لإحتواء خلايا غمد الحزمة على كلوروبلاستيدات فإنها تعتبر مصدرا للطاقة اللازمة لعملية تحميل اللحاء، وذلك تحت ظروف الإضاءة، بالإضافة إلى قربها الشديد من اللحاء.

ولقد وجد أيضا أنه عندما يكون السكروز بالورقة مرتفعا، فإن خلايا غمد الحزمة، قد تكون ذات جهد أسموزي مرتفع، عن الأنابيب الغربالية المجاورة، مما يسهل عملية تحميل اللحاء، عن طريق وجود إنحدار (ممال) تدرج تركيز السكر.

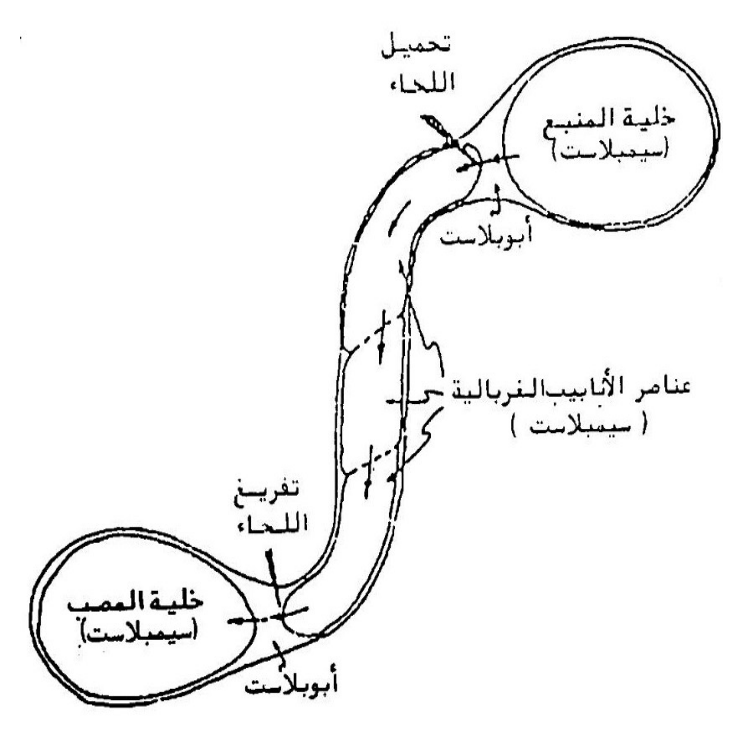
وفي النهاية الأخرى للأنبوب الغربالي (عند المصب) تتم عملية تفريغ اللحاء. وأن الدراسات التي أجريت على عملية تفريغ اللحاء قليلة، ولكن أظهرت بعض الدراسات، أن عملية تفريغ اللحاء مشابهة لعملية تحميله.

ومن ناحية أخرى فقد وجدت أدلة على أن عملية تفريغ اللحاء قد تحدث بواسطة نقل مباشر من سيمبيلاست خلايا اللحاء إلى خلايا المصب.

وفي الوقت الحاضر، توجد أدلة على أن عملية تفريغ اللحاء تحدث بواسطة آليات مختلفة في الأنسجة المختلفة، وقد تختلف بإختلاف مرحلة تكشف أو تكوين المصب.

العلاقة بين المنبع والمصب وتوزيع نواتج التمثيل

حركة إنتقال نواتج التمثيل الضوئي من المنبع إلى المصب، يمكن تمثيلها بشكل (٥-٥).



شكل (٥-٥). رسم تخطيطي مبسط يوضح إنتقال نواتج التمثيل الضوئي من المنبع إلى المصب (عن جاردنر وآخرون ١٩٨٥).

إن خلية المنبع القائمة بالتمثيل الضوئي تنتج سكر. وأن هذا السكر الناتج يمكنه الإنتقال عن طريق السيمبلاست إلى الأنابيب الغربالية، وذلك عن طريق عملية تحميل اللحاء. وأن تحميل اللحاء يعمل على زيادة تركيز السكروز في خلايا الأنابيب الغربالية عن مثيله في الأبوبلاست.

وفي المصب يمتص السكر من الأنابيب الغربالية، وذلك عن طريق عملية تفريغ اللحاء، ويتحول هذا السكر إلى مكونات خلوية جديدة، أو إلى مركبات كربوهيدراتية ذات تأثير قليل على ضغط الإمتلاء.

إن عملية تفريغ اللحاء تخفض من تركيز السكر في الأنابيب الغربالية، كما أن تجميع السكريات في المنبع، وإزالتها من اللحاء بواسطة المصب، يعمل على إيجاد منحدر (ممال) ضغط الإمتلاء في اللحاء، والذي يؤدي إلى سريان الماء والسكريات من المنابع إلى المصبات.

العوامل التي تؤثر على إنتقال وتوزيع نواتج التمثيل الضوئي من المنبع إلى المصب

١- تدرج التركيز

طبقا لنظرية سريان الكتلة، فإن أي عامل يؤثر على زيادة كفاءة التمثيل الضوئي فإنه يؤدي إلى زيادة معدل الإنتقال. ولكن هذا يكون صحيحا فقط إذا كان لدى المصبات القدرة الكافية على الإستفادة من كميات كبيرة من نواتج التمثيل الضوئي، التي تصل إليها من المنابع، أما إذا كانت المصبات غير قادرة على الإستفادة من نواتج التمثيل الضوئي التي تصل إليها من المنابع فقد يحدث تجميع للسكر في المنابع، وفي وعاء النقل، مما يؤدي إلى تثبيط عملية التمثيل الضوئي، ويعتقد أن معدل التمثيل الضوئي يقل في المنبع (الأوراق) حتى يتساوى تقريبا مع معدل قدرة المصب على إستقبال نواتج التمثيل الضوئي.

٢- الهرمونات النباتية

نتيجة لتأثير الهرمونات على النشاط الإنزيمي، فقد يكون لها تأثيرا كبيرا على عملية توزيع نواتج التمثيل الضوئي داخل النبات. وهناك بعض الأدلة على ذلك، إذ وجد أنه عندما وضع أندول حمض الخليك (IAA) أو السيتوكينينات، أو حمض الجبريلك، على سطح الساق بعد قطعها، فقد سببت هذه المواد تجميع نواتج التمثيل الضوئي في منطقة إضافتها (Gifford and Evans, 1981).

ومن الجدير بالذكر، أن العامل الرئيسي الذي يتحكم في معدل توزيع السكروز بين الجذور والمجموع الخضري في بادرات الفول، يعزي إلى تركيز الأكسين والسيتوكينين في المصبات المختلفة (Gersani, *et.al.* 1980)

وعموما- قد أظهرت معظم الأبحاث تأثيرا غير مباشر للهرمونات على إنتقال نواتج التمثيل الضوئي، وذلك عن طريق تأثيرها على زيادة طلب خلايا المصب لنواتج التمثيل واستخدامها في الحصول على الطاقة والبناء. ولقد وجد أن الأنسجة الميرستيمية التي تنتج أعلى تركيز من الأكسين هي التي يكون لها أولوية الحصول على الذائبات العضوية من المنابع.

٣- العناصر الغذائية

إن بعض العناصر الغذائية تؤثر على إنتقال الذائبات العضوية، وخصوصا السكروز داخل النبات، ومن أهم هذه العناصر البورون والبوتاسيوم.

ويعتقد أن البوتاسيوم يشجع إنتقال الذائبات العضوية، إذ وجد أنه يؤدي إلى زيادة وزن درنات البطاطس وجذور البنجر، وهذا يعتبر مدلولا على سرعة إنتقال الذائبات العضوية.

٤- درجة الحرارة

إن إنتقال الذائبات داخل النبات يتأثر بدرجة الحرارة بطريقة مشابهة للعمليات الفسيولوجية الأخرى، أي أن معدل الإنتقال يزداد بزيادة درجة الحرارة حتى يصل إلى الحد الأقصى، ثم يقل بعد ذلك بسبب التأثيرات الضارة لدرجة الحرارة المرتفعة.

ولقد وجد أن تعريض السيقان وأعناق الأوراق إلى درجة حرارة ١٥ درجة مئوية أو أقل يؤدي إلى نقص معدل إنتقال المواد الكربوهيدراتية بالمقارنة مع المعدل في درجة حرارة ٢٠-٣٠درجة مئوية.

ولقد وجد أن درجة حرارة الجذور تؤثر على إتجاه إنتقال الذائبات العضوية، إذ وجد أن حفظ درجة حرارة الجذور عالية عن درجة حرارة السيقان يزيد من معدل إنتقال الذائبات العضوية إلى الجذور، ويقلله إلى السيقان، ولقد حدث العكس عندما كانت درجة حرارة السيقان أعلى من درجة حرارة الجذور، وقد يرجع ذلك إلى أن إرتفاع درجة حرارة الجذر أو الساق، يؤدي إلى زيادة معدل تنفس هذه الأعضاء، وبالتالي زيادة الطلب على نواتج التمثيل الضوئي في هذه الأعضاء النباتية.

٥- الضوء

لقد سبق أن ذكرنا في الباب الثاني أن معدل التمثيل الضوئي يزداد بزيادة شدة الإضاءة، كما تزداد نسبة الوزن الجاف للجذور إلى الوزن الجاف للمجموع الهوائي بزيادة شدة الإضاءة، وهذا يدل على أن معدل إنتقال الذائبات العضوية إلى الجذور يفوق معدل الإنتقال إلى الساق في حالة زيادة شدة الإضاءة الساقطة على النباتات.

توزيع نواتج التمثيل الضوئي داخل النبات أثناء فترات النمو المختلفة وعلاقتها بكمية المحصول

١- توزيع نواتج التمثيل الضوئي أثناء فترة النمو الخضري

إن الأوراق والأجزاء الأخرى من النبات، تعتبر المصادر الرئيسية للتمثيل الضوئي بالنبات. ولا يتم إنتقال كل نواتج التمثيل الضوئي هذه خارج هذه المصادر، بل تبقى كمية منها في هذه الأنسجة الخضراء، لتستخدم في إمداد الخلايا بالطاقة اللازمة لنشاطها. وعندما يكون معدل إنتقال نواتج التمثيل الضوئي خارج الخلايا بطيئا، فإنها تتحول داخل هذه الخلايا إلى نشا أو إلى أي صورة أخرى من صور التخزين، أما الجزء الباقي فيرحل إلى المجموع الخضري الذي يمثل المصبات الخضرية، حيث يستعمل في عمليات النمو والتخزين.

وأثناء مرحلة النمو الخصري، فإن الجذور والسيقان والأوراق تعتبر مصبات متنافسة على نواتج التمثيل الضوئي، وأن نسبة هذه النواتج التي توزع على هذه الأعضاء (المصبات) الثلاثة، يمكن أن تؤثر على نمو وإنتاجية المحصول.

إن إستغلال نواتج التمثيل الضوئي في تكوين مساحة ورقية أكبر يؤدي إلى زيادة كفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة على النباتات، ولكن في نفس الوقت، تحتاج هذه الأوراق إلى كل من الماء والعناصر الغذائية من التربة عن طريق الجذور، ولذلك فمن الضروري إستغلال بعض نواتج التمثيل الضوئي في نمو الجذور للقيام بوظيفتها في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية من التربة، واللازمة لنمو المجموع الخضري. وأن بعض نباتات المحاصيل ومنها النباتات العشبية Grasses تنمو سيقانها ببطئ شديد أثناء فترة النمو الخضري، وهذا يؤدي إلى زيادة نسبة نواتج التمثيل الضوئي التي توزع إلى الجذور والأوراق الحديثة.

وأن بعض الميرستيمات يكون لديها القدرة على جذب نواتج التمثيل الضوئي، وعلى سبيل المثال، الميرستيمات البينية للأوراق تكون أكثر تهيئا لإستقبال نواتج التمثيل الضوئي أكثر من ميرستيمات الساق والجذور. كما أن الأوراق الحديثة أثناء تكوينها، تحتاج إلى إمدادها بنواتج التمثيل الضوئي لإستغلالها في الحصول على الطاقة والمواد العضوية لنموها وتكشفها، إلى أن تنتج كميات كافية من نواتج التمثيل الضوئي لسد إحتياجاتها. ولقد وجد أن

أوراق فول الصويا تصل إلى مرحلة الإكتفاء الذاتي من نواتج التمثيل الضوئي، عندما يتم تكوين ٥٠% من سطحها النهائي.

وتحت الظروف البيئية المثلى للتمثيل الضوئي، فإن الأوراق الناضجة ترحل ٦٠-٨٠% من نواتج تمثيلها الضوئي إلى مناطق أخرى بالنبات (Hofstra and Nelson, 1969).

وكلما تقدمت الأوراق في العمر، وتبدأ في الشيخوخة، فإنها قد تفشل في سد إحتياجاتها من الطاقة اللازمة لنشاطها، وذلك إما بسبب الشيخوخة أو تظليلها بواسطة الأوراق العليا أو بسبب الشيخوخة والتظليل معا. وتحت مثل هذه الظروف فإن مثل هذه الأوراق لا ترحل أو تستقبل نواتج تمثيل ضوئي، وبدلا من ذلك فإن معدل تنفسها يقل بدرجة كبيرة، وهذا يسمح للورقة بأن تبقى حية فقط فترة أطول، وقبل موت هذه الأوراق فإن الكثير من المركبات العضوية والغير عضوية الموجودة في الورقة يعاد نقلها إلى الأجزاء الأخرى من النبات، كما سوف يأتي ذكره.

إن تكوين ونمو الأفرع (الأشطاء) على النباتات يحتاج إلى إستقبال نواتج تمثيل ضوئي من الساق الرئيسي (النبات الأم) أو أفرع أخرى إلى أن تصبح هذه الأفرع المتكونة ذاتية التغذية. وفي محاصيل الحبوب تصبح الأفرع (الأشطاء) ذاتية التغذية في مرحلة ٢-٤ أوراق على الفرع.

٢- توزيع نواتج التمثيل أثناء مرحلة النمو التكاثري

إن النمو الثمري يعتبر غالبا، هو الجزء الرئيسي من النبات، والذي يحصد كمحصول. وأن المحاصيل التي تعتبر الأزهار أو الثمار أو الجذور (ومنتجاتها)، هي المحصول الإقتصادي، قد انتخبت، على أساس قدرتها على نقل كميات كبيرة من مادتها الجافة إلى هذه الأجزاء الثمرية (المحصول الإقتصادي). في مثل هذه النباتات يلزم، تكوين مساحة ورقية كبيرة قبل الإزهار والإثمار. وبعد الإزهار والإثمار يصبح المصب (الأجزاء التكاثرية) فعالا بدرجة كبيرة، ولذلك فإنه يحد من نواتج التمثيل التي تصل إلى الأوراق الحديثة والسيقان والجذور، أي يكون لها أولوية الطلب لنواتج التمثيل.

وفي الأنواع النباتية محدودة النمو Determinate، يتوقف نمو الأوراق والسيقان عند الإزهار، كما هو الحال في محاصيل الحبوب، بينما الأنواع غير محددة النمو، فقد تنمو خضريا وثمريا في وقت واحد، ولذلك فإن مثل هذه الأنواع النباتية، تختلف قوة المصب الخضري بالنسبة للمصب الثمري في جذب نواتج التمثيل الضوئي، فإن كان النمو الخضري قويا بدرجة كبيرة أثناء

النمو الثمري، فقد يكون على حساب النمو الثمري وبالتالي يقل المحصول الثمري.

وفي محاصيل الحبوب (نمو محدود) يكون النمو في بداية حياة النبات نموا خضريا، وهذا يساعد النبات على إصطياد (إعتراض) أكبر كمية من الطاقة الضوئية اللازمة للتمثيل الضوئي، كلما إزدادت النباتات في الحجم كما تقوم النباتات بامتصاص كميات مناسبة من الماء والعناصر الغذائية اللازمة لمو الأوراق. وأن عدد الأوراق يثبت عند إستبداء تكوين وطرد النورات.

وبعد التلقيح والإخصاب بفترة قصيرة، تصبح البذور هي المصب السائد للنباتات الحولية، ولذلك، فإنه أثناء إمتلاء البذور فإن الجزء الأعظم من نواتج التمثيل المنتجة بواسطة الأوراق والأجزاء الخضرية، أو تلك المواد المخزنة تستعمل في زيادة وزن البذور (إمتلاء البذور).

دليل الحصاد Harvest Index

هناك مصطلحان يستعملان لوصف إنتاج وتوزيع المادة الجافة بواسطة النبات هما:

١- **المحصول البيولوجي** Biological yield وهو عبارة عن كمية المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات.

٢- **المحصول الإقتصادي** Economic yield أو Agricultural yield وهو عبارة عن وزن أو حجم أعضاء النبات التي تكون المنتج الإقتصادي أو الزراعي. وأن المحصول الإقتصادي عبارة عن الحبوب في محاصيل الحبوب، والألياف في محاصيل الألياف، والدرنات في المحاصيل الدرنية، والزيت في محاصيل الزيت، والسيقان في قصب السكر، والجذور في بنجر السكر.

وإن النسبة بين المحصول الإقتصادي والمحصول البيولوجي، يطلق عليها دليل الحصاد Harvest index أو Coefficient of effectiveness أو Migration coefficient، ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\text{دليل الحصاد} = \frac{\text{المحصول الإقتصادي}}{\text{المحصول البيولوجي}} \times ١٠٠$$

ولما كان المحصول البيولوجي، كما سبق أن ذكرنا، عبارة عن كمية المادة الجافة الكلية التي يكونها النبات، لذلك فإنه يجب أن يشتمل على وزن الجذور، ولكن نظرا إلى أن الجذور لا يمكن الحصول عليها كاملة تحت

ظروف الحقل، فإن المحصول البيولوجي في هذه الحالة يشمل فقط وزن كل أجزاء النبات الموجودة فوق سطح الأرض، عند الحصاد أو النضج.

ومن الجدير بالذكر، أن دليل الحصاد يبين كفاءة النبات في نقل وتخزين المادة الجافة إلى المصب (وعاء المحصول)، أو بمعنى آخر، كفاءة النبات في تحويل نواتج التمثيل الضوئي إلى محصول إقتصادي.

وعلى سبيل المثال، ففي محصول القمح،، إذا كان وزن الحبوب والقش معا يساوي ٩٠ وحدة وزنية، ووزن الحبوب فقط يساوي ٤٥ وحدة وزنية، فإن دليل الحصاد يحسب كالآتي:

$$\text{دليل الحصاد} = \frac{٤٥}{٩٠} \times ١٠٠ = ٥٠\%$$

مما سبق يتضح، أن محصول النباتات المنزرعة يمكن زيادته، إما عن طريق زيادة المادة الجافة الكلية المنتجة في الحقل، أو عن طريق زيادة نسبة المحصول الإقتصادي (دليل الحصاد) ، او عن طريقهما معا.

ويعتبر دليل الحصاد من الصفات الهامة التي يجب أن تؤخذ في الإعتبار عند الإنتخاب لمحصول الحبوب المرتفع في محاصيل الحبوب، إذ يوجد هناك تباينا كبيرا بين الأصناف المختلفة للمحصول بالنسبة لدليل الحصاد.

وفي بعض محاصيل الحبوب، مثل القمح والأرز والشعير وفي محصول الفول السوداني تكون الزيادة في كمية محصول الحبوب أو البذور راجعة أساسا إلى الزيادة في دليل الحصاد.

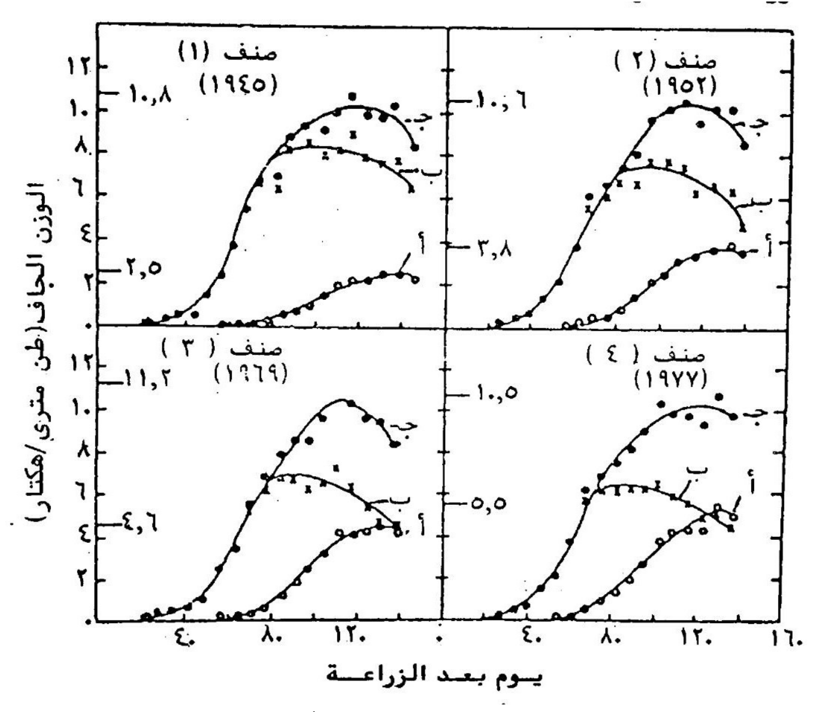
ولقد وجد دانكن وآخرون عام ١٩٧٨م في الفول السوداني أن الصنف Dixie Runner القديم الذي أستنبط عام ١٩٤٣م، ذو دليل حصاد قدره ٢٣، ومحصول بيولوجي قدره ١٠.٨ طن متري لكل هكتار.

وفي عام ١٩٥٣، أستنبط الصنف Early Runner، والذي أعطى زيادة قدرها ٥٠% في محصول البذور عن الصنف القديم السابق. وهذه الزيادة في كمية المحصول ترجع أساسا إلى الزيادة في دليل الحصاد والذي وصل إلى ٣٦.

وفي عام ١٩٦٩م، أعطى الصنف Florunner زيادة قدرها ٢٠% في محصول البذور عن الصنف السابق Early Runner ، نتيجة زيادة دليل الحصاد إلى ٤١.

وفي عام ١٩٧٧م، أدخل الصنف Early Bunch ، والذي أعطى زيادة في محصول البذور قدرها ١٠% عن الصنف Florunner بسبب الزيادة في دليل الحصاد إلى ٥١، كما هو مبين بشكل (٥-٦).

ومن الجدير بالذكر، أن محصول المادة الجافة الكلية (المحصول البيولوجي) لهذه الأصناف متماثلا، وبمعنى آخر، أن هذه الأصناف تتساوى في إنتاجها من المادة الجافة الكلية، ولكنها تختلف في كمية المادة الجافة التي تنقل إلى البذور (المحصول الإقتصادي).



شكل (٥-٦). وزن الثمار (المحصول الإقتصادي) (أ)، وزن المجموع الخضري (ب)، الوزن الكلي للمادة الجافة المتكونة (المحصول البيولوجي) (جـ)، لأربعة أصناف من الفول السوداني هي: ١) صنف Dixie Runner، ٢) صنف Early Runner ، ٣) صنف Florunner ، ٤) صنف Early Bunch. (عن داتكن وآخرون، ١٩٧٨)

مكونات المحصول Yield Components

إن محصول الحبوب (المحصول الإقتصادي) يتكون من عدد من المكونات تسمى مكونات المحصول، أو سعة وعاء المحصول، ويمكن أن يعبر عنها كالآتي:

محصول الحبوب = عدد النورات × عدد الحبوب × وزن الحبة
في وحدة المساحة   في وحدة المساحة   في النورة   الواحدة

$$W_g \times N_g \times N_R = Y$$

يتأثر كل مكون من هذه المكونات بكثير من العوامل أهمها، العمليات الزراعية، والظروف البيئية، والتركيب الوراثي للصنف المنزرع. وأن عدد الوحدات الثمرية (النورات، السنابل، الكيزان) في وحدة المساحة من الأرض، يتأثر تأثرا كبيرا بالظروف البيئية والوراثية بدرجة رئيسية، أثناء طور النمو الخضري للنباتات، نتيجة لتأثير هذه العوامل على عدد الأفرع أو الأشطاء التي تكونها النباتات. وعلى سبيل المثال، تبدأ معظم نباتات محاصيل الحبوب بتكوين أفرع أو أشطاء بعد أسبوعين إلى ثلاثة أسابيع بعد الزراعة، وتختلف المدة التي تظل فيها النباتات في تكوين أفرع على الصنف والظروف البيئية النامي فيها النبات.

من ذلك يتضح أن، عدد الوحدات الثمرية في وحدة المساحة، يتحدد أثناء الأطوار الأولى من حياة النبات، ولذلك فإن أي عملية زراعية من شأنها زيادة النمو الخضري فإنها سوف تؤدي إلى زيادة عدد الأفرع وبالتالي زيادة عدد الوحدات الثمرية.

ويتأثر عدد الحبوب في النورة (الوحدة الثمرية) تأثرا كبيرا بالظروف البيئية والوراثية أثناء تكوين الأزهار والتلقيح والإخصاب، نتيجة لتأثير هذه العوامل على عدد الأزهار المتكونة، وعدد الأزهار التي يتم تلقيحها، وعدد الأزهار الملقحة التي تكون حبوب. ولذلك فإن تعرض النباتات إلى أي ظروف غير مناسبة خلال فترة التزهير والتلقيح والإخصاب سوف يؤدي إلى نقص عدد الحبوب في النورات.

وتؤثر العوامل البيئية والوراثية على متوسط وزن الحبة، أثناء فترة إمتلائها، وذلك نتيجة لتأثير تلك العوامل على المواد الممثلة والميسرة للنبات، أي تؤثر على كفاءة عملية التمثيل الضوئي للنبات أثناء فترة إمتلاء الحبوب.

حيث وجد أن نواتج التمثيل الضوئي للأجزاء الخضراء على النبات أثناء فترة إمتلاء الحبوب، ولذلك فإن متوسط وزن الحبة يرتبط بطول الفترة التي تظل فيها الأوراق خضراء وقائمة بعملية التمثيل الضوئي.

مساهمة المواد الغذائية المخزنة بأجزاء النبات قبل الإزهار في محصول الحبوب

تنتقل نواتج التمثيل الضوئي من أماكن تكوينها إلى مناطق أخرى بالنبات، ففي مراحل معينة من نمو النبات، تنتج كميات من المواد الممثلة تزيد عن الكميات اللازمة لنموه، ولذلك فإنها تحول إلى مركبات مخزنة في أجزاء معينة من النبات مثل السيقان والأوراق لحين حاجة النبات إليها. وتلعب هذه المركبات المخزنة دورا هاما في إنتظام إستمرارية النمو. وتتكون المركبات المخزنة بالنبات غالبا من المواد الكربوهيدراتية بالإضافة إلى البروتينات والليبيدات وغيرها.

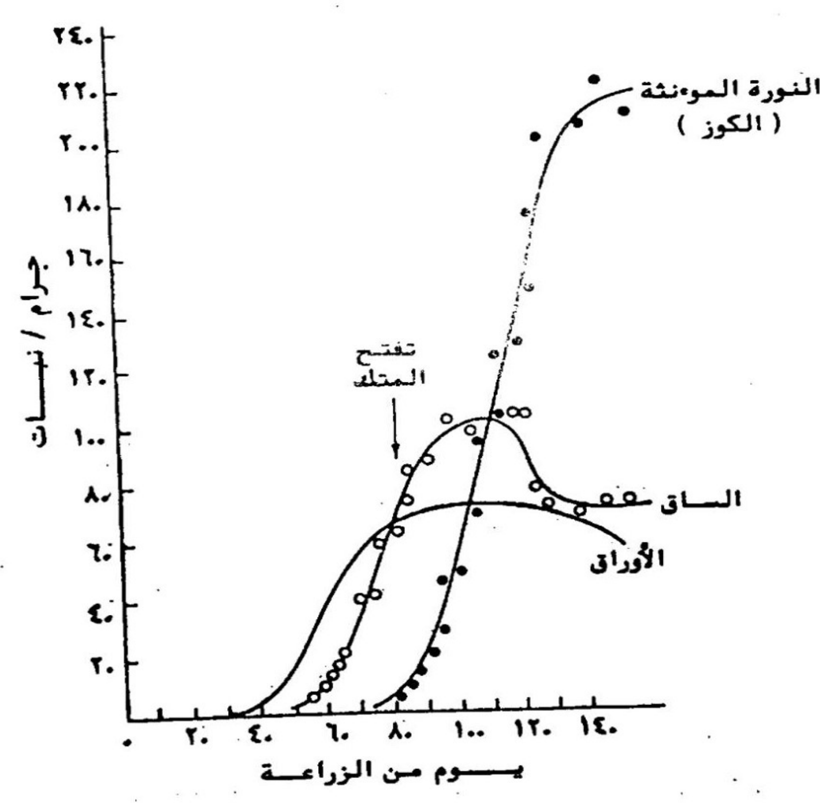
والمثال على إعادة نقل المواد الغذائية المخزنة باعضاء النبات المختلفة إلى الحبوب عند تكوينها (شكل ٥-٧). ففي أثناء فترة النمو الخضري لا يوجد عادة تخزين للمواد الكربوهيدراتية في السيقان، ويرجع ذلك إلى زيادة معدل الإستفادة من هذه المواد في تكوين المجموع الخضري والجذري.

وعند طرد النورات المذكرة (مرحلة النمو الثمري) وقبل مرحلة التلقيح والإخصاب وإمتلاء الحبوب في الذرة الشامية، يتوقف النمو الخضري والجذري تقريبا، بينما تستمر عملية التمثيل الضوئي في إنتاج مواد ممثلة تزيد عن حاجة النبات، ولذلك فيتم تخزين المواد الغذائية الزائدة في السيقان وقواعد الأوراق وأغمادها تخزينا مؤقتا لحين إنتقالها إلى الحبوب أثناء تكوينها وإمتلائها (شكل ٥-٧).

ومن الجديرر بالذكر، أن إعادة نقل المركبات يحدث لكل من المركبات العضوية وغير العضوية على حد سواء، فأثناء شيخوخة الأوراق تنقل المواد الكربوهيدراتية والفوسفور والبوتاسيوم والكبري والعناصر الأخرى المخزنة إلى المصبات النشطة حينئذ بالنبات مثل، البذور أثناء تكوينها.

ولقد وجد أن إزالة الأوراق من نباتات الذرة الشامية، أثناء إمتلاء الحبوب وترك الكيزان، فإن تركيز المواد الصلبة الكلية الذائبة، والموجودة في السلاميات السفلى من الساق قد إنخفض من ٥% إلى ١% تقريبا، خلال تسعة أيام من تاريخ إزالة الأوراق. وهذا يوضح أن المواد الغذائية المخزنة بالساق

والقابلة للإنتقال، تستخدم في نمو الكيزان وامتلاء الحبوب، ومما يؤكد ذلك أن النباتات التي عوملت بنفس الطريقة، ولكن مع إزالة الكيزان، فإنه لم يحدث نقصا ملحوظا في تركيز السكر في السلاميات السفلى على الساق. وفي تجربة أخرى وجد نفس الباحث أن الكيزان قد ظلت مستمرة في الزيادة في الوزن بعد إزالة كل الأوراق، ويرجع ذلك إلى إنتقال المواد الكربوهيدراتية من السيقان إلى الحبوب. (دانكن Duncan عام ١٩٧٥).



شكل (٥-٧). التغير في الوزن الجاف لنباتات الذرة الشامية، أثناء دورة حياتها (عن دانكن، عام ١٩٧٥).

كما وجد، أن المواد الغذائية المخزنة في السيقان وقواعد الأوراق وأغمادها تساهم بحوالي ١٢-١٤% في إمتلاء حبوب الذرة الشامية، متوقفا ذلك على الصنف والظروف البيئية السائدة أثناء إمتلاء الحبوب. (دانكن Duncan وآخرون عام ١٩٧٥).

عموما- يتم إنتقال المواد الغذائية من السيقان وأغماد الأوراق تحت الظروف القاسية والغير مناسبة للنمو. وتعتبر كمية المواد الغذائية المخزنة بالسيقان وقواعد الأوراق والقابلة للإنتقال إلى الكيزان من العوامل المحددة لمحصول الحبوب في الذرة الشامية.

ومن الجدير بالذكر أنه إذا كان حجم المصب (عدد الكيزان على النبات وعدد الحبوب بالكوز) محدودا فإن المواد الغذائية تتجمع في السيقان وأغماد الأوراق، وأثناء فترة إمتلاء الحبوب، لأن المواد الناتجة من التمثيل الضوئي تزيد عن حاجة نمو الحبوب وامتلائها، وعلى العكس من ذلك إذا كانت نواتج التمثيل الضوئي محدودة، وحجم المصب كبير فإن المواد الغذائية المخزنة بالساق وقواعد الأوراق وأغمادها تنتقل إلى الحبوب، لأنه تحت هذه الظروف يكون إحتياج الحبوب أكثر من الكمية التي تصلها من التمثيل الضوئي.

ويبين شكل (٥-٧)، التغير في الوزن الجاف للأجزاء المختلفة لنبات الذرة الشامية، وميعاد تكشفها، ويبين الشكل زيادة وزن الساق بعد تفتح المتك، ثم نقصه كلما إقتربت النباتات من النضج، وهذا التغير في وزن الساق يبين مقدار مساهمة المواد الغذائية المخزنة بالساق في إمتلاء الحبوب.

ولقد وجد أن نواتج التمثيل الضوئي التي خزنت بالنبات قبل الإزهار، تساهم بحوالي ٢٥% من محصول الحبوب النهائي في القمح.

جدول (٥-٢). مساهمة نواتج التمثيل الضوئي المخزنة بالنبات قبل الإزهار في محصول الحبوب في القمح والشعير النامية تحت الظروف الرطبة والجافة.

المحصول	ظروف النمو	محصول الحبوب (جرام/م^2)	نواتج التمثيل الضوئي المخزنة بالنبات قبل الإزهار، التي ساهمت في محصول الحبوب	
			(جرام/ م^2)	(%)
القمح	رطبة	٥٠٩	٦٤	١٣
	جافة	٢٩٤	٧٩	٢٧
الشعير	رطبة	٦٧٣	١٣	١١
	جافة	٣٠٢	٢٧	٤٤

(عن أوستين Austain، ١٩٨٠)

وأن الإجهاد الرطوبي (الجفاف) أثناء إمتلاء الحبوب، يؤدي إلى نقص محصول الحبوب، بسبب نقص التمثيل الضوئي، ولذلك فإنه تحت مثل هذه الظروف، تزداد نسبة المواد الغذائية المخزنة في إمتلاء الحبوب، كما هو مبين بجدول (٥-٢).

وعلى الرغم من أن المواد المخزنة التي تنتقل إلى الحبوب تعتبر مكونا هاما في محصول الحبوب، إلا أن كفاءة عملية التمثيل الضوئي أثناء فترة إمتلاء الحبوب تعتبر المصدر الرئيسي لنواتج التمثيل التي تساهم في محصول الحبوب، كما سبق أن ذكرنا.

الباب السادس

النمو الخضري
Vegetative Growth

يمر النبات أثناء دورة حياته بمراحل مختلفة، ويمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل أساسية هي، مرحلة الإنبات، ومرحلة النمو الخضري، ومرحلة النمو الثمري، وفي مرحلة النمو الخضري تتكون الأعضاء الخضرية والتي تتضمن البراعم والأوراق والسيقان.

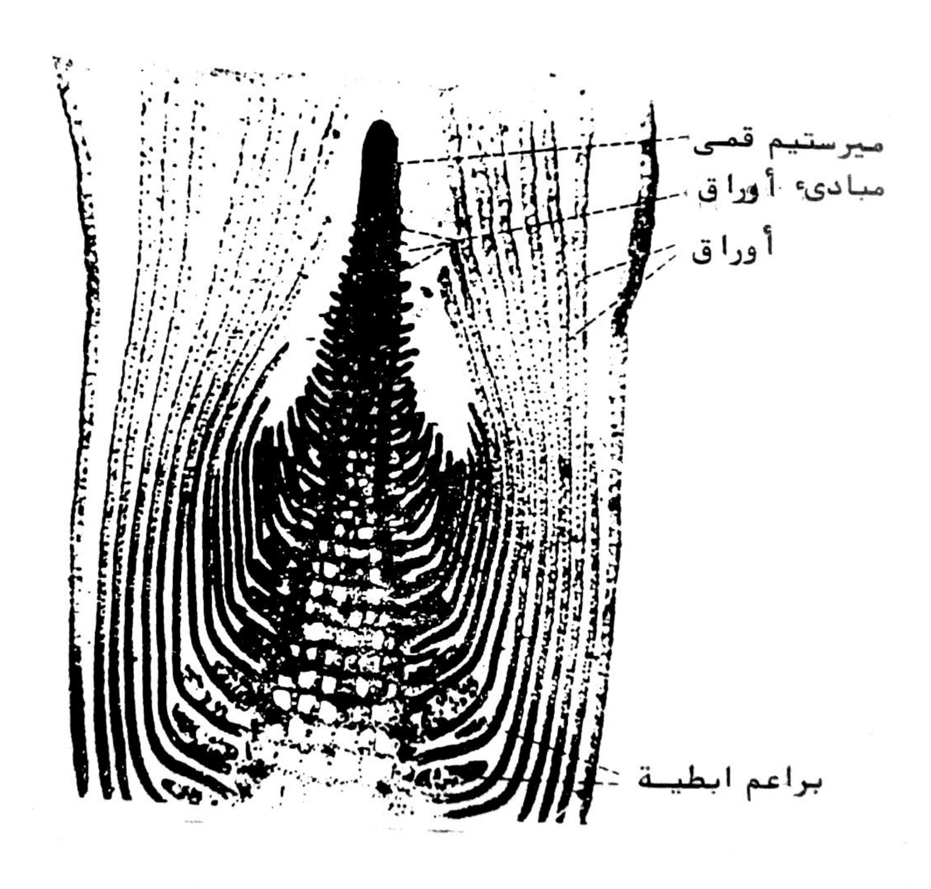
البراعم Buds

تنشأ الأعضاء الخضرية من البراعم القمية Apical or Terminal buds والجانبية (الإبطية) Axillary buds، ويمكن أن يتكون نموا جديدا من البراعم العرضية Adventitious buds، وهي البراعم التي في أي مكان على الساق ماعدا قمم السيقان والأفرع وآباط الأوراق، إذ قد تتكون على السيقان في غير المواقع السابقة أو على الأوراق، أو على الجذور، كما في جذور البطاطا.

يحتوي البرعم على مبادئ أوراق وعقد وسلاميات قصيرة جدا، ولذلك فيعتبر البرعم ساقا صغيرة جدا غير متكشفة، وعقدها متقاربة جدا وأوراقها صغيرة جدا، كماهو مبين بشكل (٦-١).

ويتكون البرعم من وحدات يطلق عليها Phytomer، تتكون كل منها من:
١- عقدة وسلامية الساق، ٢- الورقة، ٣- برعم إبطي.

وفي بعض الأنواع النباتية يوجد على الفيتومير التام التكوين، مبادئ جذور، كما هو الحال في نبات القصب وغيره. وفي بعض النباتات تتحول أجزاء البرعم القمي إلى نورة كما هو الحال في نباتات العائلة النجيلية. وبغض النظر عن النوع النباتي، فإن جميع البراعم متماثلة في الشكل المورفولوجي والوظيفة.



شكل (٦-١). قطاع طولي في القمة النامية للساق

الأوراق

تعتبر الأوراق أكثر أجزاء السيقان الهوائية وضوحا. وتقوم الأوراق بتكوين الغذاء في النباتات الراقية عن طريق التمثيل الضوئي كما سبق أن ذكرنا في الباب الثاني ولذلك فهي ذات أهمية حيوية للنباتات نفسها. كما تقوم الأوراق أيضا بالنتح، والذي يعتبر أهم عامل يساعد في صعود الماء والعناصر الذائبة من الجذر إلى أعلى النبات، كما سوف نوضحه في الباب التاسع بمشيئة الله تعالى.

والأوراق تكون عادة متسعة ومسطحة الشكل، وتتباين كثيرا في الشكل والحجم والتركيب الداخلي من نوع نباتي إلى آخر، كما قد تختلف من جزء نباتي إلى آخر في النبات الواحد.

إستبداء تكوين وتكشف الأوراق

تنشأ الأوراق كبروزات جانبية للميرستيمات القمية في البراعم، حيث تبدأ مجموعة من الخلايا في الطبقات الخارجية للنسيج الإنشائي الطرفي على مسافة قليلة خلف الميرستيم القمي (القمة النامية للساق) في الإنقسام بسرعة وتكوين مبادئ الأوراق Leaf primirdia على جوانب القمة النامية.

ويتكون البرعم القمي (شكل (٦-١) أساسا من كتلة محدبة أو مخروطية الشكل من نسيج ميرستيمي موجود حولها بروزات جانبية صغيرة هي مبادئ الأوراق، والتي تنمو مكونة الأوراق الناضجة للنبات، وذلك عند نمو البرعم. وتنظم مبادئ الأوراق هذه حول القمة النامية بطرق مختلفة. وأن طريقة ترتيب مبادئ الأوراق حول القمة النامية هي التي تحدد طريقة ترتيب الأوراق على الساق أو الفرع عند نموها. وقد تنشأ مبادئ بعض الأوراق بالبذرة أثناء تكوينها كما هو الحال في الذرة والقمح وغيرها.

وعند ثبات الظروف البيئية النامي فيها النبات، فإن مبادئ الأوراق تظهر على القمة النامية للساق بمعدل ثابت للنوع النباتي الواحد. ويطلق على الفترة التي تنقضي بين ظهور مبادئ ورقتين متتاليتين بـ"بلاستوكرون Plastochron"، بينما يطلق على الفترة التي تنقضي بين ظهور قمتي ورقتين متتاليتين بـ"فيلوكرون Phyllochron"، وقد يختلف طول هذه الفترة عنها في البلاستوكرون.

العوامل المؤثرة على معدل إستبداء وتكوين الأوراق

إن الأبحاث التي أجريت على معدل إستبداء وتكوين الأوراق Leaf initiation rate محدودة. ولقد وجد في هذا المجال أن الحرارة والضوء، وبعض العوامل الأخرى تؤثر على معدل البلاستوكرون، إذ وجد في الراي جراس أن درجات الحرارة المرتفعة نسبيا (١٨-٢٥° م) وشدة الإضاءة العالية، تؤديان إلى زيادة معدل كل من البلاستوكرون والفيلوكرون. ولقد وجد أيضا أن رفع درجة الحرارة من ١٥إلى٢٠°م، أدت إلى زيادة معدل ظهور الأوراق في القمح بأكثر من ٥٠%. وأن معدل ظهور الأوراق في الشعير قد زاد زيادة خطية، وذلك بزيادة شدة الإضاءة الساقطة على النباتات.

عدد الأوراق

إن عدد الأوراق المتكونة على الساق الأصلي أو الفرع يتحدد بواسطة إستبداء تكوين النورات في العائلة بواسي poaceae (النجيلية)، وأن الأفرع الثانوية وما بعدها في المنشأ، يقل عدد الأوراق عليها بمقدار ورقة أو ورقتين عن عدد الأوراق الذي يوجد على الساق الأصلي، وحيث أن هذه الأفرع (الأشطاء) تتكون متأخرا، وتتعرض إلى نفس الظروف البيئية (حرارة وإضاءة وغيرها) التي يتعرض لها الساق الأصلي، فإنها تدفع (تستحث) للإزهار وبذلك فإن إستبداء الأزهار على الأشطاء يحدث عند عدد أقل من الأوراق على الفرع بالمقارنة بالساق الأصلي.

عدد الأوراق الذي يتكون على نباتات القمح والشعير عادة هو ٧-٩ ورقة، وعلى نباتات الذرة الرفيعة ٧-١٤ ورقة، وفي معظم هجن الذرة الشامية ١٤-٢١ ورقة، وفي فول الصويا ١٠-١٦ ورقة.

ولقد وجد أن عدد أوراق الذرة الشامية يرتبط إرتباطا كبيرا بطول الساق وميعاد النضج.

وأن عدد مبادئ الأوراق التي توجد في جنين البذرة الناضجة تعتبر صفة مميزة للنوع النباتي. وأن معظم حبوب النجيليات مثل القمح، تحتوي على ثلاث أوراق في البذرة الناضجة، بينما تحتوي حبة الذرة الشامية الناضجة على خمسة أوراق.

العوامل المؤثرة على نمو الأوراق

يتأثر نمو الورقة بالتركيب الوراثي، وموقع الورقة على النبات، والظروف البيئية مثل الحرارة والإضاءة والتسميد والري وغيرها.

١- موقع الورقة على النبات

إن موقع الورقة على النبات والذي يتحدد أساسا بواسطة التركيب الوراثي، ذو تأثير كبير على معدل نمو الورقة، ومساحتها النهائية وأيضا قدرتها على الإستجابة للظروف البيئية مثل الرطوبة الميسرة (المتاحة) للنبات بالتربة.

ويزداد طول الورقة وعرضها وبالتالي مساحتها زيادة مضطردة مع تقدم النباتات في العمر، إلى نقطة معينة، ثم تقل بعد ذلك، حيث تكون الأوراق الأكثر إتساعا موجودة على الجزء الوسطي من الساق، كما هو الحال في نباتات الذرة الشامية.

إن ورقة العلم Flag leaf (آخر ورقة على النبات) في الذرة الشامية تكون أقصر وأضيق وذات مساحة أقل عن ورقة الكوز. هذا الشكل يعتبر صفة مميزة لكثير من الأنواع النباتية. وفي بعض الأنواع النباتية الأخرى مثل الشعير، فإن طول نصل الورقة يقل عند إستبداء تكوين الأزهار، بينما يزداد عرض الورقة، مما يؤدي إلى تكوين ورقة علم عريضة. وقد يرجع السبب في صغر حجم الأوراق العليا عن الأوراق الوسطى على الساق إلى المنافسة بين الأوراق والنورات على نواتج التمثيل الضوئي.

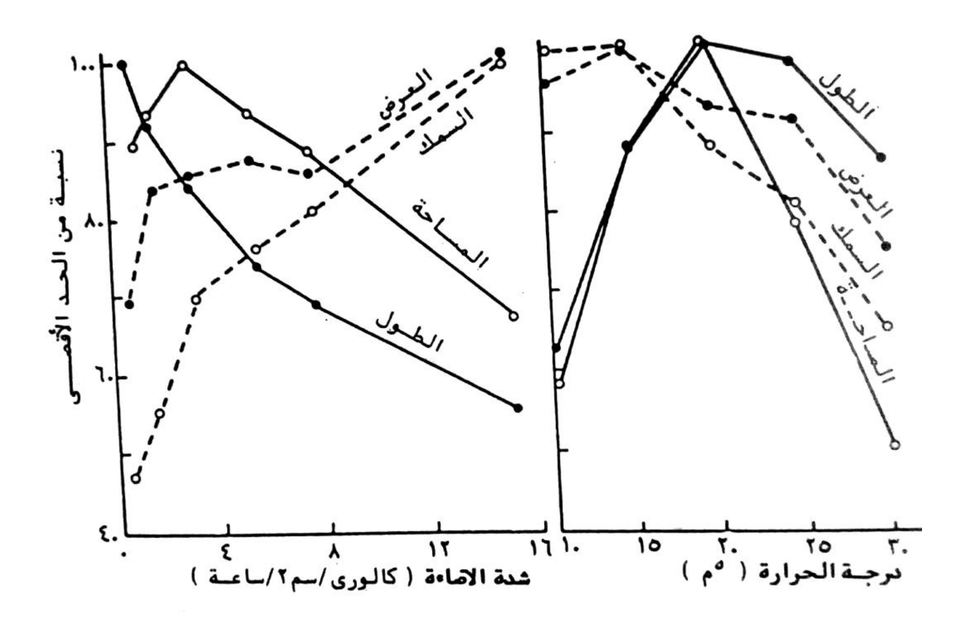
٢- التسميد الأزوتي

يؤثر التسميد الأزوتي تأثيرا كبيرا على انبساط (إتساع) الأوراق وخصوصاعلى عرض الورقة ومساحتها. ولقد وجد أن نقص النيتروجين بالنبات يؤدي إلى نقص مساحة السطح الورقي.

٣- درجة الحرارة والإضاءة

لقد وجد أن إستطالة أوراق القمح، كان أقل كثيرا أثناء الليل عنه أثناء النهار، ويصل معدل الإستطالة إلى الصفر إذا طالت فترة الظلام، ولقد كان هذا الإنخفاض مرتبطا أيضا بشدة الإضاءة المنخفضة أثناء فترة الضوء التي سبق التعرض إليها. ولقد وجد في أحد أصناف القمح (ماركوس Marquis) أن درجات الحرارة المرتفعة نسبيا (٢٥°م) وتحت ظروف النهار الطويل، وشدة الإضاءة المنخفضة (حوالي ١٤-٤٢ وات/ م^{٢}) أدت إلى تكوين أوراقا طويلة إسطوانية قليلة السمك (Friend, 1966) كما هو مبين بشكل (٦-٢)، ومن ناحية أخرى، فإن درجة الحرارة المنخفضة (١٥°م)، وشدة الإضاءة العالية والنهار القصير، تؤدي إلى نقص طولها وسمكها، وأن أكبر مساحة أوراق أمكن التوصل إليها كانت تحت المستويات المعتدلة من درجة الحرارة وشدة الإضاءة.

ولقد أيدت دراسات لانجر Langer عام ١٩٥٤ على نباتات Timothy هذا الإستنتاج، إذ وجد أن درجات الحرارة المرتفعة نسبيا داخل الصوبة الزجاجية أدت إلى زيادة طول الورقة بمقدار الضعف، عن مثيلتها المنزرعة في درجة الحرارة العادية منخفضة نسبيا) خارج الصوبة، إذ كان الفيللوكرون Phyllochron ٩.٣ أيام، ١٣.٥ يوم للنباتات المنزرعة داخل الصوبة ومثيلتها المنزرعة خارج الصوبة، على الترتيب.



شكل (٦-٢). تأثير الضوء ودرجة الحرارة على نمو أوراق القمح. (عن فريند، ١٩٦٦)

كما وجد أن نباتات القمح المرتبعة Vernalized (التي تعرض لدرجات الحرارة المنخفضة لفترة معينة) تنتج أوراق ذات أنصال أقصر عن مثيلتها الغير مرتبعة (Westmore and Steeves, 1977).

شيخوخة الأوراق Leaf senescence

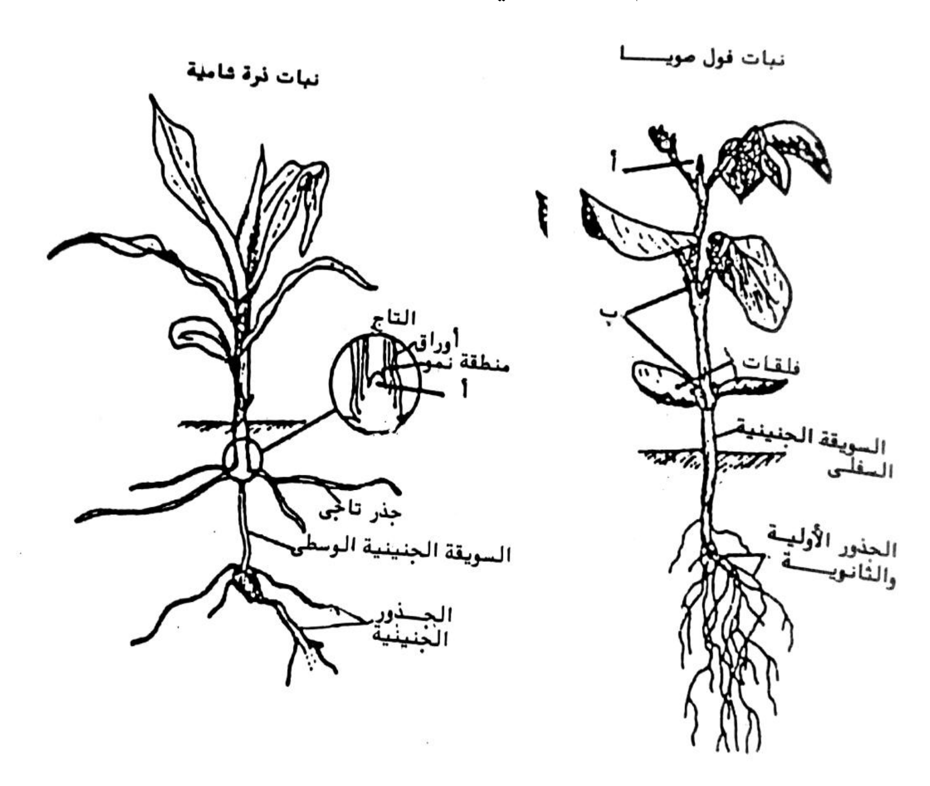
إن عدد الأوراق ودليل مساحة الأوراق يصل إلى حده الأقصى ثم يبقى ثابتا بعد ذلك إلى أن تبدأ الأوراق في الشيخوخة.

وأن التوازن في دليل مساحة الأوراق الناتج عن فقد الأوراق السفلى بمعدل يساوي معدل إنتاج أوراقا جديدة على النبات من أعلى يعمل على بقاء دليل مساحة الأوراق ثابتا عند أعلى قيمة له.

وأن شيخوخة الورقة الفردية في النجيليات تبدأ من الجزء المسن من الورقة (قمة الورقة) ثم تتجه إلى أسفل.

وأن شيخوخة النبات تبدأ من الأوراق القاعدية (الأكبر سنا)، وتتجه إلى أعلى. وعلى سبيل المثال، تنتج الذرة الشامية ١٠-١٢ ورقة وبتقدم النباتات في العمر يفقد النبات ٤-٥ أوراق عن طريق الشيخوخة والجدير بالذكر أن الفقد في دليل مساحة الأوراق يكون صغيرا نسبيا، لأن الأوراق المفقودة تكون صغيرة كما سبق أن ذكرنا. وعادة تكون الورقة الخامسة على نباتات الذرة الشامية عند طرد النورة المذكرة هي أول ورقة خضراء فتية.

ويعتقد أن سبب شيخوخة الأوراق هي عملية إنتقال وإعادة توزيع للعناصر المعدنية والمواد العضوية إلى المصبات الأكثر منافسة، مثل الأوراق الحديثة العمر والثمار والأفرع والجذور. وأن مساهمة الأوراق في إمداد هذه الأعضاء النباتية يقل تدريجيا بتقدم الأوراق في الشيخوخة.



شكل (٦-٣). نبات حديث العمر للذرة الشاميةوفول الصويا.
يتضح من الشكل مكان مناطق النمو (أ)، والبراعم الإبطية في فول الصويا (ب).

إن الإنتاج السريع للأوراق، وكذلك الزيادة في مساحتها، تعتبر من العوامل الهامة جدا في إنتاج المحاصيل، إذ يؤدي ذلك إلى الوصول إلى أقصى كفاءة للكساء الخضري للمحصول في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه، وهذا يؤدي بدوره إلى الوصول إلى أقصى كفاءة تمثيل ضوئي، كما أن سرعة تكوين مجموع خضري كبير لنباتات المحصول المنزرع يساعد أيضا في تقليل منافسة الحشائش، إذ وجد أن زيادة معدل التقاوي عن الحد الأمثل في الفول السوداني يؤدي إلى نقص منافسة الحشائش النامية بين سطور المحصول.

السيقان

تعتبر السيقان هي أساس المجموع الخضري، وتنمو من النهاية العليا للبادرة، فتستطيل الريشة، وينتج عنها ساقا تحمل أوراقا تخرج من مناطق توجد عليه تسمى عقد، ويطلق على أجزاء الساق الواقعة بين العقد بالسلاميات.

وظائف الساق

يقوم الساق بالوظائف الآتية:

١- تحمل الساق الأوراق بنظام معين، يجعلها في وضع يمكنها من التعرض لأكبر كمية من الأشعة الضوئية الساقطة على النبات، وتحويلها إلى طاقة كيماوية عن طريق التمثيل الضوئي.

٢- تقوم الساق بتوصيل الماء والعناصر الغذائية من الجذور إلى الأوراق أساسا عن طريق الخشب، وكذلك نقل الغذاء الممثل من الأوراق إلى أجزاء النبات المختلفة عن طريق اللحاء.

٣- تقوم سيقان بعض نباتات محاصيل الحقل بتخزين المواد الغذائية مثل السكر كما هو الحال في نباتات قصب السكر، والنشا كما هو الحال في درنات البطاطس، كما تقوم سيقان كثير من النباتات بتخزين المواد الغذائية المختلفة الزائدة عن حاجة النبات أثناء فترة النمو الخضري، تخزينا مؤقتا لحين تكوين أعضاء التخزين، مثل النورات في محاصيل الحبوب، ثم تنتقل هذه المواد المخزنة إلى الحبوب، وتساهم في محصول الحبوب. وأن هذه المواد الغذائية المخزنة تخزينا مؤقتا في السيقان قبل طرد النورات في محصول الأرز، تؤثر تأثيرا منظما على إمتلاء الحبوب تحت الظروف البيئية الغير مناسبة مثل نقص الرطوبة الأرضية وقت طرد النورات والأزهار، كما أن هذه المواد المخزنة في السيقان قبل طرد النورات، تلعب دورا هاما في منع تكوين حبوب فارغة،

خلال الأسبوعين أو الثلاثة أسابيع التي تلي الإزهار مباشرة في الوقت الذي يكون فيه نمو الحبوب أكثر نشاطا كما سبق أن ذكرنا في الباب الخامس.

٤- تقوم سيقان النباتات الحديثة العمر بالتمثيل الضوئي لإحتوائها على كلوروفيل.

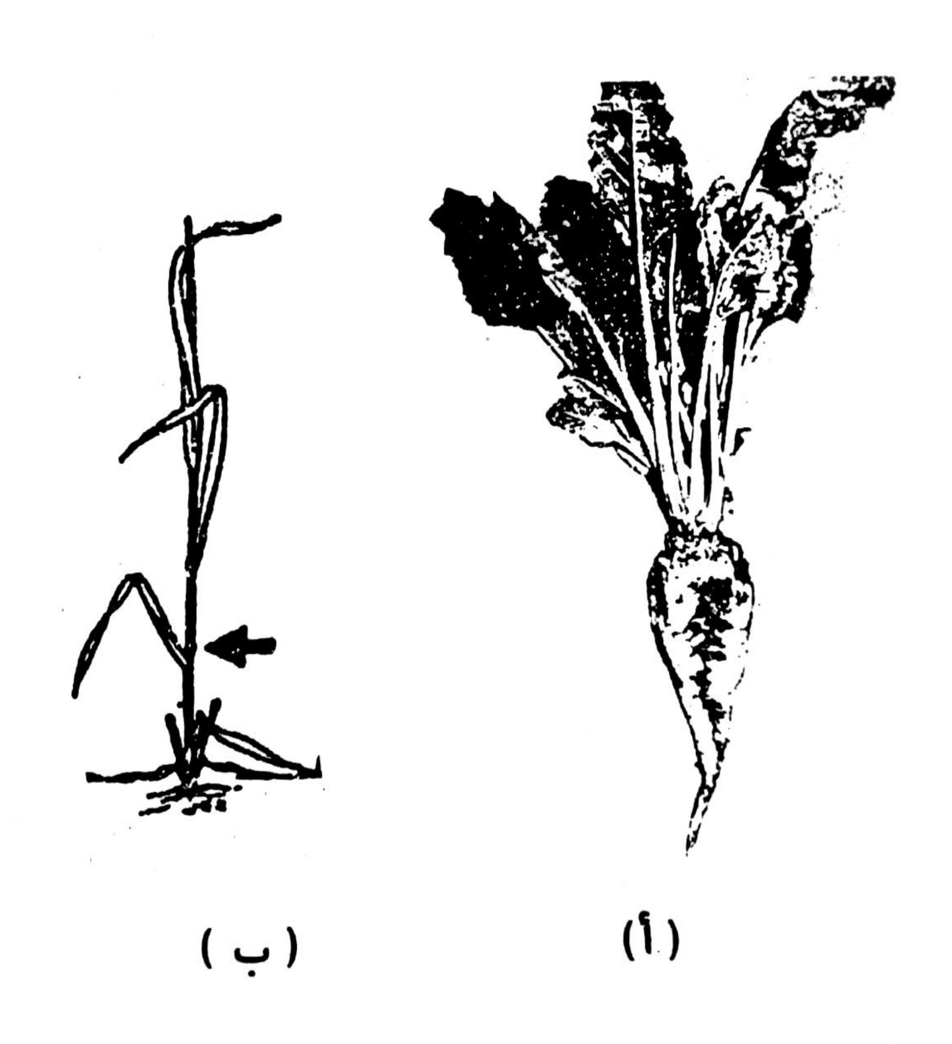
٥- تستخدم سيقان بعض النباتات في التكاثر الخضري كما هو الحال في سيقان قصب السكر. وتتميز النباتات الناتجة من العقل الساقية بأنها تكون متماثلة وراثيا للنباتات الأم المأخوذة منه العقل.

يعتبر طول سيقان نباتات محاصيل الحبوب الصغيرة (مثل القمح والشعير والأرز) من أهم الصفات المورفولوجية المرتبطة بقدرتها المحصولية، إذ أن الأصناف التي تتميز بسيقانها الطويلة الضعيفة فإنها ترقد مبكرا وتزداد حدة الرقاد (ميل النباتات ناحية الأرض) تحت ظروف التسميد العالي. ويؤدي الرقاد إلى نقص كمية محصول الحبوب، وأن إنتاج أصناف قصيرة الساق، قد أدت إلى زيادة كمية محصول الحبوب في مثل هذه المحاصيل بدرجة كبيرة، وذلك بسبب مقاومتها للرقاد وكذلك إستجابتها للتسميد الأزوتي العالي. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الأصناف ذات السيقان القصيرة جدا غير مرغوبة، وذلك لأن أوراقها تكون متقاربة جدا على الساق، وهذا يؤدي إلى تظليل بعضها البعض ونقص كفاءتها التمثيلية.

ويمكن تقسيم النباتات على أساس طول سلاميات الساق إلى:

١- **نباتات قصيرة الساق:** وتتميز نباتات هذه المجموعة بعدم وجود سلاميات واضحة بسيقانها ، مثل النباتات ذات الحولين أثناء موسم نموها الأول، مثل بنجر السكر وبعض النباتات الحولية الأخرى (شكل (٦-٤).

٢- **نباتات طويلة الساق:** تتميز نباتات هذه المجموعة بسيقانها ذات السلاميات الواضحة مثل القمح والذرة وغيرها (شكل (٦-٤)، وكذلك النباتات ذات الحولين أثناء موسم نموها الثاني.



شكل (٦-٤). أ) نبات بنجر (ثنائي الحول) في موسم نموه الأول (عديم الساق). ب) نبات القمح في طور النمو الخضري، ذو ساق (يشير السهم إلى مكان عقدة الساق).

إستطالة السلاميات

إن الزيادة في طول الساق تحدث في الميرستيمات البينية الموجودة بالسلاميات، كما سبق أن ذكرنا في الباب الثالث.

ويزداد طول السلاميات عن طريق الزيادة في كل من عدد الخلايا وزيادة الخلايا في الحجم. وتؤدي زيادة الخلايا في الحجم إلى زيادة طول السلامية، إذ قد تصل هذه الزيادة إلى ٢٥سم أو أكثر. وأن النمو الناتج عن إنقسام الخلايا،

يكون عند قاعدة السلامية (أي الميرستيم البيني) أكثر منه في الميرستيمات القمية.

وأن حامل النورة Peduncle (سلامية الساق الأخيرة التي تحمل النورة في النجيليات)، وكذلك الحامل الزهري في النباتات ذات الفلقتين ينموان من الميرستيم البيني.

وبالإضافة إلى نقص عدد الخلايا النشطة في الميرستيمات البينية، فإن كمية هرمونات النمو في الميرستيمات البينية قد تكون محدودة، إذ أنها لا تنتج (تخلق) ذاتيا في الميرستيم البيني بعكس الميرستيم القمي، وبالتالي فإن منظمات النمو يجب أن تنتقل من أجزاء نباتية أخرى إلى الميرستيم البيني، لذلك فإن كثيرا من النباتات تستجيب للمعاملة بمنظمات النمو، وخصوصا الجبريلين. ولقد وجد المؤلف عام، ١٩٧٩م، أن رش نباتات القمح بواسطة ١٠٠٠ جزء في المليون من حمض الجبريلين، أدى إلى زيادة في طول النباتات بمقدار ٥٥% عن مثيلتها التي لم ترش بمحلول حمض الجبريلين.

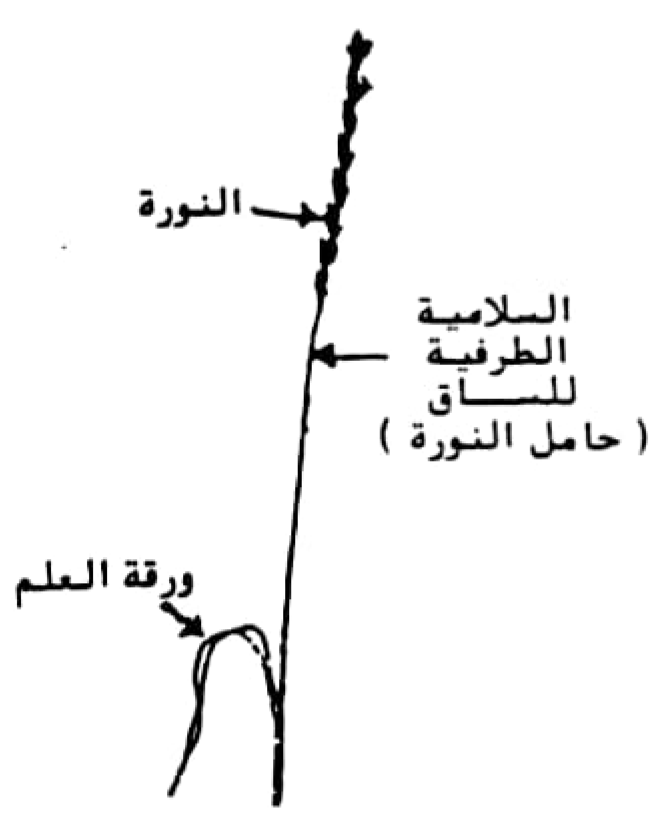
وأن نباتات الذرة الشامية لا تكون سيقانا واضحة حتى إرتفاع ٤٠سم تقريبا، وتكون ٨ أوراق تامة التكوين، والتي تنشأ من الساق الخضري Vegetative stem أو Pseudostem وفي هذا الطور لا يكون نمو السلامية واضحا (شكل ٦-٣).

وبسبب التقارب الشديد للعقد والسلاميات فإن النباتات ثنائية الحول تنتج مجموعا خضريا متوردا عديم الساق Stemless rosette في العام الأول من النمو، وكذلك النباتات النجيلية في المناطق المعتدلة تنتج سيقانا خضرية، حتى إستبداء تكوين الأزهار، وعندئذ (إستبداء تكوين الأزهار) تستطيل السلامية التي تحمل النورة في النجيليات أو النباتات ذات الحولين.

إن حامل الثمرة Peg أو Gynophore في الفول السوداني، يمكن إعتباره ساقا ثمرية عديمة العقد على الرغم من إختلافه لحد ما عن الساق الزهرية النموزجية من حيث المنشأ.

وفي نباتات الفلقة الواحدة أو ذات الفلقتين التي تتميز بسلاميات الساق الطويلة، فإن طول السلامية يزداد كلما إتجهنا إلى أعلى الساق، كما هو الحال في سيقان القصب، إذ يتكون الساق من سلاميات قصيرة جدا عند قاعدة الساق، ثم يزداد طول السلامية من قاعدة الساق ، ثم يزداد طول السلامية من قاعدة الساق إلى القمة الطرفية، ثم يقل طول السلامية قريبا من القمة الطرفية. ولقصر السلاميات القاعدية للنبات أهمية كبية بالنسبة للتفريع القاعدي. وهذا

النظام والذي فيه تتعاقب سلاميات قصيرة من أخرى طويلة على الساق تعتبر صفة من صفات بعض الأنواع النباتية. حيث تكون السلاميات القاعدية لعديد من الأنواع النباتية قصيرة جدا لدرجة أنه قد لا يمكن ملاحظتها، بينما السلاميات العليا على ساق النجيليات وخصوصا حامل السنبلة (النورة) قد يزيد طوله عن ٢٥سم. (شكل ٦-٥).



شكل (٦-٥). حامل النورة (السلامية الطرفية للساق) في القمح

تكوين التاج Crown development

إن العقد المتقاربة السفلى على الساق تكون التاج والذي يوجد عند أو أسفل سطح التربة مباشرة. وفي النباتات النجيلية مثل القصب والذرة وغيرها يتكون على هذه العقد حلقات من أصول (مبادئ) الجذور العرضية أو التاجية (شكل ٦-٣). وهنا تجدر الإشارة إلى أن النباتات البقولية المعمرة مثل البرسيم الحجازي تكون تاجا ولكن لا يتكون عليه جذورا عرضية. وأن مواضع النمو في تاج النجيليات يكون أسفل سطح التربة مباشرة.

العوامل المؤثرة على نمو الساق

تؤثر كثير من العوامل على نمو الساق ومن أهمها منظمات النمو والضوء والحرارة والتغذية المعدنية والمحتوى الرطوبي للتربة.

١- منظمات النمو

لقد وجد أن منظمات النمو وخصوصا الجبريلينات، تسبب زيادة في طول الساق في الأصناف قصيرة الساق في بعض الأنواع النباتية مثل الذرة الشامية، إذ أن المعاملة بالجبريلين تسبب زيادة تنشيط نمو السلامية عن طريق زيادة تركيز الجبريلين داخل النبات، وعلى العكس من ذلك، فلا تستجيب بعض أصناف السورجم القصيرة الساق إلى المعاملة بالجبريلين.

٢- الضوء

يؤثر الضوء تأثيرا كبيرا على نمو الساق، ففي الظلام تستطيل السلاميات بدرجة كبيرة، ويشبه ذلك إستطالة السويقة الجنينية الوسطى.

إن سلاميات النباتات المظللة كما هو الحال في النباتات المنزرعة بكثافات عالية تكون أكثر إستطالة من مثيلتها المنزرعة بكثافات أقل. وتؤدي زيادة إستطالة السيقان في نباتات محاصيل الحبوب الصغيرة مثل القمح والشعير والأرز إلى نقص صلابة السيقان حيث لا تبنى الأنسجة الدعامية بدرجة كافية، وهذا يؤدي إلى زيادة الرقاد، ونقص المحصول، ولذلك فينصح بزراعة النباتات بكثافات مناسبة، حتى يصل الضوء إلى الأجزاء القاعدية من النباتات وتزيد من صلابة السيقان وعدم الرقاد.

ويعتقد أن تأثير التظليل على إستطالة السيقان ترجع إلى تأثير الأكسين وقد يساهم الجبريلين في ذلك. ونظريا فإن هدم الأكسين بواسطة الضوء يكون أقل في النباتات المظللة، حيث أن شدة الإضاءة العالية تقلل من تركيز الأكسين وبالتالي من إرتفاع النباتات.

إن طول النهار يؤثر في نمو الساق ولكن بدرجة أقل وضوحا من تأثيره على الإزهار، كما سوف يأتي ذكره في الباب الحادي عشر. ولقد وجد أن النهار الطويل يسبب زيادة في طول السلاميات، وطول الساق وخصوصا في حالة نباتات النهار القصير.

٣- التغذية المعدنية ويسر الماء

تؤثر التغذية بالعناصر المغذية وكذلك يسر الماء بالتربة على نمو السلاميات، وذلك عن طريق تأثيرها على زيادة الخلايا في الحجم، كما هو الحال في أي عضو ثمري أو خضري، وبالتالي يؤدي النيتروجين والماء إلى زيادة طول النباتات.

التفريع

إن البراعم الموجودة في آباط الأوراق إما أن تتكشف إلى أفرع جانبية Side branches (في النباتات ذات الفلقتين) أو إلى أشطاء Tillers (في النباتات النجيلية) متوقفا ذلك على النوع النباتي والظروف البيئية.

وأن النباتات تكون لها القدرة باستمرار على التفريع الجانبي، طالما توجد براعم في آباط الأوراق، ولكن الجدير بالذكر أن الهجن الحديثة من الذرة الشامية لا تتفرع، فيما عدا نمو البراعم التي تحمل الكيزان، على الرغم من توافر الظروف البيئية المناسبة، ويرجع ذلك إلى التحكم الداخلي القوي للعوامل الوراثية (Duncan, 1975). إن الفرع الجانبي الذي يحمل الكوز يمكن دفعه على التكوين على بضع عقد سفلى على الساق، إذا كسرت السيادة القمية، وعلى سبيل المثال، تؤدي إزالة الفرع الجانبي الذي يحمل أول كوز حديث العمر على الساق إلى تشجيع نمو الكوز التالي الأسفل منه مباشرة وهكذا، وأن عدد الكيزان الذي يمكن أن يتكون على النبات يساوي عدد الأوراق، لأن كل ورقة على الساق يوجد في إبطها برعم.

ويطلق على الأفرع في النباتات النجيلية بالأشطاء، بينما يطلق عليها بالأفرع الجانبية في النباتات ذات الفلقتين. وأن منشأ هذه الأفرع في النباتات النجيلية والنباتات ذات الفلقتين متماثل، إذ أن كل منهما ينشأ من إبط ورقة، وأن الأفرع تتكون من أسفل إلى أعلى، حيث تبدأ من أسفل عقدة على الساق. وفي القمح يتكشف أول شطئ (فرع) من إبط غمد الريشة Coleoptile axil، وفي الأرز من إبط الورقة الثالثة. وبغض النظر عن النوع النباتي ، فإن البراعم السفلى الموجودة على الساق الرئيسي، تتكشف إلى أفرع أولية Primary tillers وهذه بدورها تتكشف إلى أفرع ثانوية Secondary بدورها أيضا إلى ثالثية Tertiary، وهكذا. وبوجه عام، كل الأفرع الأولية تتكشف قبل أي فرع ثانوي أو ثالثي.

وفي النباتات البقولية الحولية، مثل فول الصويا، تنتج أفرعا من العقد السفلى الستة على الساق، متوقفا ذلك على الصنف والظروف البيئية،

خصوصا تجت ظروف شدة الإضاءة العالية، والزراعة على مسافات واسعة. أما البراعم التي تبقى ساكنة سواء الموجودة على الأفرع أو على الساق الرئيسية، فإنها تنشط بواسطة الفترة الضوئية المهيئة للإزهار وذلك في نهاية موسم النو، مكونة عناقيد زهرية (نورات).

العوامل المؤثرة على التفريع

يتأثر تفريع النباتات بكل من العوامل الورائية (التركيب الوراثي) والعوامل البيئية، وأهمها الضوء والرطوبة الأرضية ودرجة الحرارة ومنظمات النمو وغيرها. وسوف نوضح فيما يلي تأثير هذه العوامل.

١- التركيب الوراثي Genotype

إن عدد الأفرع الذي يمكن أن يتكون على النبات يرتبط مباشرة بعدد الأوراق الموجودة على النبات، ولكن ليست كل البراعم الإبطية تتكشف إلى أفرع، كما يوجد في إبط أوراق بعض الأنواع النباتية، أكثر من برعم ولذلك فينتج أكثر من فرع واحد من إبط الورقى الواحدة.

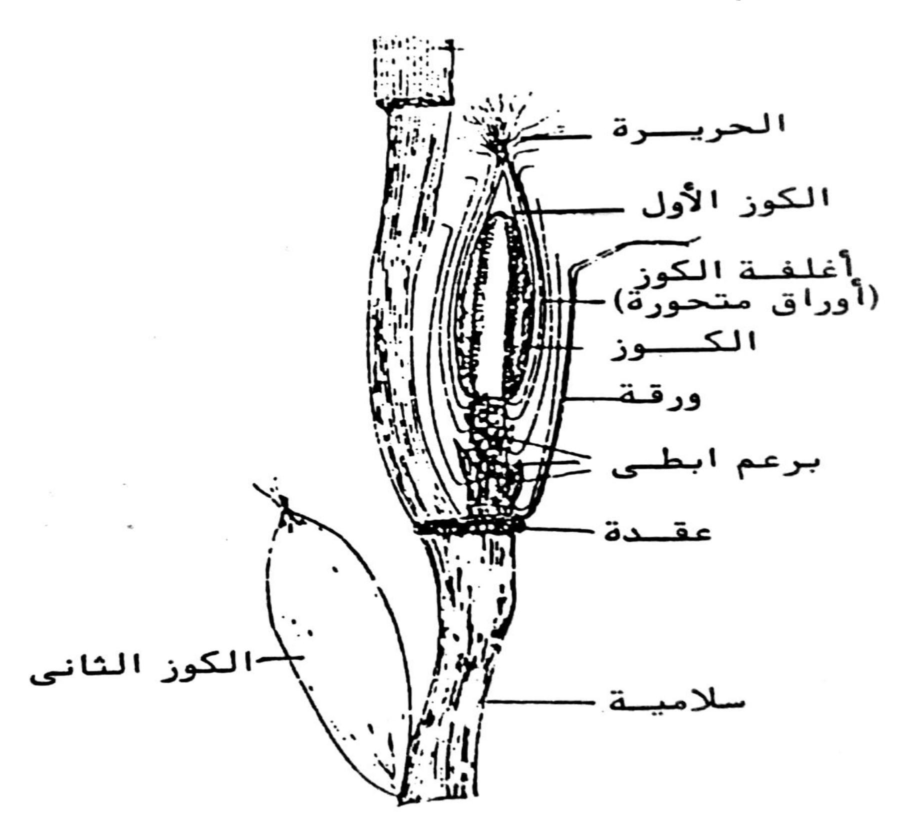
لقد تمت دراسة تأثير التركيب الوراثي على التحكم في التفريع الحانبي في نباتات الشوفان Oats وقد وجد أن طرز الشوفاان قليلة التفريع الربيعية يتكون على كل نبات في المتوسط من ٥.٧ – ٧.١ فرع عندما تزرع النباتات في سطور تبعد عن بعضها بمقدار ٣٠سم، بينما تكون الأصناف غزيرة التفريع تحت نفس الظروف ٩.١-١٣ فرع لكل نبات (فري Frey وويجانز Wiggans).

وفي القمح يختلف عدد الأشطاء (الأفرع) التي تتكون على النباتات بإختلاف التركيب الوراثي (الصنف) ولكن مدى الإختلاف بين التراكيب الوراثية المختلفة أضيق عما هو الحال في الشوفان.

إن البراعم الإبطية الموجودةعلى سيقان الذرة الشامية، لا تنتج أفرعا خضرية Vegetative shoots في الهجن الحديثة، ولكن البرعم الموجود في إبط الورقة ١١، وأيضا الموجود في إبط الورقة ١٠ ينمو مكونا فرعا قصيرا يحمل كوز. وأن الأفرع التي تحمل كيزانا تكون متحورة بالمقارنة بالأفرع العادية، حيث تكون فيه العقد متقاربة جدا نتيجة لقصر السلاميات، كما أن الأوراق الموجودة عليه (أغلفة الكوز) أقصر كثيرا من الأوراق العادية (شكل ٦-٦). وأن الفرع ينتهي بالنورة السنبلية (الكوز) بدلا من النورة المذكرة التي ينتهي بها الساق. وتحت الظروف المثلى يمكن أن يتكون أكثر من كوزين على

بعض التراكيب الوراثية. كما أنه إذا أزيل الكوز العلوي في بداية تكوينه فإن البرعم الأسفل منه ينمو مكونا فرعا قصيرا يحمل كوزا. ومن الجدير بالذكر أن البراعم الإبطية الموجودة أعلى الكوز الأول تكون ساكنة تماما ولا تظهر أي علامات تكشف بغض النظر عن الظروف البيئية أو العمليات الزراعية.

وحيث أن الأفرع الخضرية في الذرة الشامية، ليس لها أهمية بالنسبة للمساهمة في كمية محصول الحبوب، فإن الإنتخاب والتربية تكون لأصناف غير متفرعة (عديمة التفريع)، على عكس أهداف التربية في معظم محاصيل الحبوب الأخرى مثل القمح والشعير. وعلى سبيل المثال، فإن أصناف القمح والأرز التي أنتجت في الآونة الأخيرة قد أنتخبت للتفريع الغزير، إذ وجد في هذه المحاصيل أن التفريع الغزير مرتبط إرتباطا موجبا بكمية محصول الحبوب المرتفع.



شكل (٦-٦). قطاع طولي في جزء من الساق وفرع جانبي يحمل كوز (نورة مؤنثة.

٢- هرمونات النمو Growth hormones

ولقد وجد أن الأكسين ذو تأثير واضح على التفريع (تكوين أشطاء من البراعم التاجية) في الشعير (جدول ٦-٢)، ويتضح من الجدول أنه إذا أذيلت القمة النامية للساق (مصدر الأكسين)، فقد تفرعت نباتات الشعير بغزارة، إذا لم يضاف إليه الأكسين (نفثالين حمض الخليك NAA)، بينما تفرعت النباتات التي أزيلت قمتها النامية وعوملت بواسطة الأكسين بنفس الدرجة تقريبا مثل النباتات التي لم تزال قمتها النامية.

جدول ٦-٢. تأثير الأكسين على على تفريع نبات الشعير.

المعاملة	عدد النباتات	
	المتفرعة	غير المتفرعة
بدون معاملة	٣	٧
إزالة القمة النامية	٩	١
إزالة القمة النامية والمعاملة بالأكسين	٣	٧

(عن جاردنر، وآخرون، ١٩٨٥).

٣- الضوء والكثافة النباتية

إن كثافة النباتات والتي تؤثر على كمية الضوء التي تصل إلى الأجزاء القاعدية من النبات، تعتبر من العوامل الرئيسية التي تتحكم في تكشف الأفرع الجانبية على النبات، تعتبر من العوامل الرئيسية التي تتحكم في تكشف الأفرع الجانبية على النباتات، إذ وجد أن نفاذ الضوء إلى قواعد النباتات يعتبر ضروريا لتكشف الأفرع. ولقد وجدت علاقة موجبة بين التفريع وشدة الإضاءة عند قواعد النباتات في نوعين من النباتات النجيلية، أي كلما زادت شدة الإضاءة كلما زاد عدد الأفرع المتكونة على النباتات. ولقد وجد أن زيادة شدة الإضاءة من ٥٣٨٠ إلى ١٨٨٤٠ لكس (شمعة/ متر) أدى إلى زيادة عدد الأفرع على النباتات بمقدار ثلاث مرات خلال فترة قدرها أسبوعين في درجة حرارة ٢١°م نهارا و١٦°م ليلا. (عن لانجر Langer عام ١٩٧٢).

إن زيادة عدد نباتات الذرة الشامية في وحدة المساحة، يؤدي إلى نقص عدد الأفرع الجانبية التي تحمل الكيزان Ear shoots، وقد لا تتكون كيزان، إذا كانت كثافة النباتات عالية جدا أي نقص شديد في شدة الإضاءة عند قواعد النباتات. إن صفة عدم تكوين كيزان Barreness تعزي إلى التنافس على نواتج

التمثيل الضوئي حيث أن كفاءة التمثيل الضوئي تقل تحت ظروف كثافة النباتات العالية.

ومن الجدير بالذكر، أيضا أن فشل الفرع الجانبي الذي يحمل الكوز في إستبداء نموه من إبط الورقة يرتبط أساسا بالسيادة القمية التي يتحكم فيها الأكسين، ولكن بمجرد أن يبدأ الفرع الجانبي في النمو، فإن فشل نموه بعد ذلك وعدم تكوين كوز طبيعي، يرجع أساسا إلى التنافس على نواتج االتمثيل الضوئي.

٤- طول الفترة الضوئية ودرجة الحرارة

إن هناك تفاعلا بين طول الفترة الضوئية ودرجة الحرارة للتأثير على تفريع النباتات. وبوجه عام، وجد أن النباتات النجيلية التي تنمو في المناطق الباردة مثل القمح، يزداد تفريعها تحت ظروف النهار القصير ودرجات الحرارة الباردة، بينما يزداد تفريع النباتات النجيلية التي تنمو في المناطق شبه الإستوائية تحت ظروف درجات الحرارة الدافئة. ولقد وجد أن درجات الحرارة المرتفعة حتى ٣٥ºم لا تؤثر تأثيرا ضارا على تفريع مثل هذه النباتات.

ولقد وجد أن الفترة الضوئية الطويلة تقلل من تفريع بعض النباتات الإستوائية. وفي البرسيم الحجازي (من نباتات النهار الطويل) فإن النهار القصير يشجع تفريع النباتات في مرحلة النمو الخضري، ولكن النهار الطويل يشجع تفريع النباتات في مراحل نموها الأولى (طور البادرة).

وبوجه عام، يؤدي إرتفاع درجة الحرارة وخصوصا تحت ظروف النهار الطويل، إلى زيادة التفريع في عديد من الأنواع النباتية في المناطق المعتدلة. وأن إرتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى تشجيع التفريع في الأنواع النباتية في المناطق الإستوائية.

٥- الماء والعناصر الغذائية

إن توفر الرطوبة الأرضية والعناصر الغذائية يؤدي إلى تشجيع التفريع، بشرط توافر الظروف الأخرى مثل الضوء. ويؤثر النيتروجين تأثيرا كبيرا على تكوين الأفرع (الأشطاء) في النباتات النجيلية. ولقد وجد أن نسبة النيتروجين بنباتات الأرز والأعلى من ٣.٥% تعتبر ضرورية لتكوين عدد كبير من الأفرع، ويتوقف التفريع في نباتات الأرز إذا وصلت نسبة

النيتروجين إلى ٢.٥%، أما إذا إنخفضت النسبة عن ١.٥% فيحدث موت للأفرع المتكونة (Ishizuka and Tanaka, 1963).

ولقد وجد أن الفوسفور يؤثر على تفريع النباتات، ويظهر تأثير الفوسفور على التفريع بعد حوالي ٤ أسابيع من ميعاد الإضافة، بينما يحتاج النيتروجين إلى فترة أقل (حوالي ٣ أسابيع) حتى يظهر أثره على التفريع.

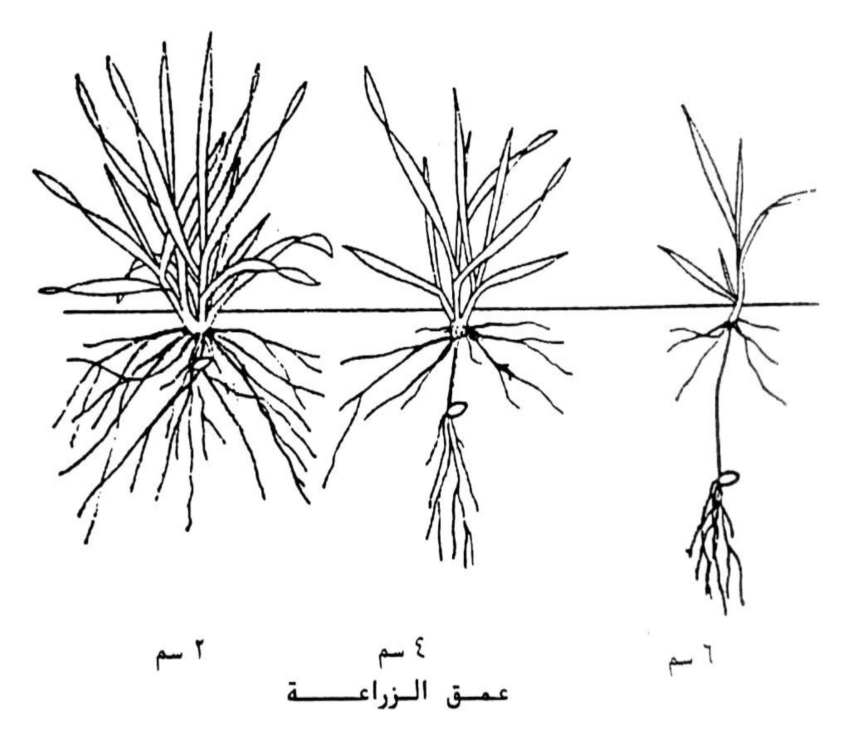
يؤدي الفوسفور والزنك إلى زيادة التفريع في نباتات القمح، ولكن ليس للبوتاسيوم تأثير على زيادة التفريع في القمح (Fuehring, 1969).

ويؤدي تعطيش النباتات إلى نقص التفريع في القمح، وتعتبر فترة تكوين الأفرع القاعدية في محاصيل الحبوب الصغيرة من الفترات الحساسة للإجهاد الرطوبي (العطش).

٦- عمق زراعة الحبوب

لقد وجد في نباتات القمح أن البراعم الموجودة على الساق على عمق أكثر من ٢.٥سم من سطح الأرض تظل ساكنة ولا تتكون منها أشطاء، أما البراعم التي توجد على عمق أقل من ذلك فتتكون منها أشطاء، ولذلك فإن الزراعة على عمق كبير، يؤدي إلى زيادة المسافة بين الحبوب وسطح التربة، والذي ينتج عنها بالإضافة إلى تأخير ظهور البادرات فوق سطح التربة إلى تكوين بادرات ضعيفة، وبالتالي يكون تفرعها أقل كما هو مبين بشكل (٦-٧).

يتضح من شكل (٦-٧) أنه كلما زاد عمق زراعة الحبوب أسفل سطح التربة، كلما أدى ذلك إلى زيادة المسافة التي يجب أن تقطعها السويقة الجنينية السفلى حتى يصل غمد الريشة إلى سطح التربة، وهذا يؤدي بدوره إلى إستهلاك جزء كبير من المواد الغذائية المخزنة في الحبوب، وذلك قبل أن يصل غمد الريشة إلى سطح التربة، وهذا يؤدي بدوره أيضا إلى إنتاج بادرات ضعيفة، وبالتالي نقص عدد الأفرع التي تتكون على النباتات.



شكل (٦-٧). تأثير عمق زراعة حبوب الشعير على نمو وتفريع النباتات. لقد زرعت الحبوب في وقت واحد على الأعماق المختلفة.

الباب السابع

نمو الجذور

Root growth

الجذر هو الجزء من النبات الذي يوجد وينمو تحت سطح التربة ولا يحمل براعم أو أوراقا. وأن نمو المجموع الجذري والمجموع الخضري للنبات يعتمد كل منهما على الآخر إعتمادا تاما، ولا يستطيع أحدهما أن يستمر في نموه بنجاح إذا فشل الآخر، وذلك نحث الظروف الطبيعية.

وعلى الرغم من الأهمية الكبيرة للجذور في نمو النبات، إلا أنها لا تنال الأهمية الجديرة بها من حيث الدراسة، ويرجع ذلك أساسا إلى أنها تنمو تحت سطح التربة، أي بعيدة عن الأنظار وبالتالي فهي بعيدة عن التفكير في دراستها، كما تواجه دراستها صعوبات عديدة.

وعموما- تعتبر إمكانية تنشيط نمو النبات عن طريق التغيير في بيئة الجذر، أكثر منها في حالة المجموع الخضري، وعلى سبيل المثال، من السهل تعديل الرطوبة الأرضية، ودرجة الحرارة والعناصر الغذائية في بيئة الجذر، بما يتناسب مع النمو الأمثل للنباتات وذلك عن طريق إجراء بعض العمليات الزراعية، مثل عمليات خدمة المحصول قبل الزراعة، والري، والتغطية، والتسميد، وعلى العكس من ذلك فإنه من الصعب، بل ومن المستحيل تغيير الجو المحيط بالمجموع الخضري تحت الظروف الطبيعية لنمو النباتات في الحقل، ولذلك فإن دراسة الجذور يجب أن تنال عناية وإهتمام أكبر عما هو عليه في الوقت الحاضر لزيادة إنتاجية المحاصيل المنزرعة.

وسوف نوضح فيما يلي وظائف الجذور المختلفة في نباتات محاصيل الحقل.

وظائف الجذور

تقوم الجذور بوظائف متعددة أهمها ما يلي:

١- إمتصاص الماء والعناصر الغذائية من التربة، وتتم عملية الإمتصاص هذه خلال قمة الجذر والشعيرات الجذرية، كما أن الجذور المسنة تمتص أيضا جزء منها، كما تقوم الجذور المسنة بنقل الماء والذائبات إلى الساق ومنه إلى باقي أجزاء النبات.

٢- تثبيت النبات في التربة، وتعتبر هذه من العمليات الهامة، إذ أن نجاح نمو نباتات محاصيل الحقل، يعتمد على نموها قائمة، وتوجد إختلافات كبيرة بين النباتات المختلفة في قدرتها على مقاومة الرياح، متوقفا ذلك على الإختلافات بينها في وجود وإمتداد مجموعها الجذري وأيضا على قوة سيقانها.

٣- تعمل الجذور كعضو هام لتخزين المواد الغذائية، وخصوصا في محاصيل الحقل ذات الفلقتين، مثل بنجر السكر، والبرسيم الحجازي، وغيرها من النباتات ذات الجذور المتشحمة، وعلى العكس من ذلك فإن جذور محاصيل الحقل النجيلية، مثل القمح والذرة وغيرها، ذات قدرة تخزينية منخفضة.

٤- تقوم الجذور بتكوين منظمات النمو، مثل السيتوكينينات، والتي تنتقل إلى المجموع الخضري للنبات، وتؤثر على كل عمليات نموه وتكشفه، بالإضافة إلى أن منظمات النمو هذه تقوم بتنشيط الميرستيم الجذري، كما وجد أيضا أن حمض الأبسيسيك Absissic acid (ABA) يتكون أيضا في المجموع الجذري، على الرغم من أن الأوراق هي المكان الرئيسي لتكوينه في النبات. ولقد وجد أن النقص الذي يحدث في نمو المجموع الخضري، عند تعريض جذور النباتات إلى ظروف غير ملائمة مثل الغمر المستمر بالماء، أو نقص الماء، او درجات الحرارة المنخفضة، يرجع إلى نقص تخليق السيتوكينينات والجبريللينات في الجذور وإنتقالها إلى المجموع الخضري (Skene, 1975).

تشريح ونمو الجذور

تمر الجذور بتغيرات تشريحية عديدة أثناء نموها، والتي تؤثر كثيرا على نفاذيتها للماء والذائبات، أثناء نموها ونضجها. وعند فحص قطاع طولي للجزء الطرفي من جذر حديث، تتضح أربعة مناطق خلوية ذات مظاهر مختلفة وهذه المناطق مرتبة من أسفل قمة الجذر إلى أعلى هي: منطقة القلنسوة Root cap، المنطقة الميرستيمية Meristematic region، ومنطقة إستطالة الخلايا Region of elongation، ومنطقة التمييز والنضج Region of maturation and differentiation.

وتوجد القلنسوة عند أقصى نهاية الجذر، وهي عبارة عن نسيج مخروطي الشكل، ويتكون من العديد من الخلايا البالغة، تغطي المنطقة الميرستيمية الواقعة خلفها مباشرة وبداخلها بصورة جزئية (شكل ٧-١)، وتحميها من الإحتكاك بحبيبات التربة، كما أنها تساعد الجذر النامي على إختراق التربة. وأن خلايا القلنسوة الخارجية تغطى من الخارج بمادة غروية لزجة، تسهل للجذر طريقه بين حبيبات التربة الخشنة. وتتآكل الخلايا الخارجية من نسيج القلنسوة، نتيجة لإحتكاك حبيبات التربة، ولهذا فيتجدد هذا النسيج باستمرارعن طريق تحول بعض خلايا الميرستيم القمي إلى خلايا بالغة تنضم إلى نسيج القلنسوة بدلا من الخلايا التالفة الخارجية منها.

وحيث أن نسيج القلنسوة لا يرتبط مباشرة بالنظام الوعائي، فلا يكون لها دور في عملية الإمتصاص. ويعتقد أن القلنسوة هي المنطقة من الجذر الذي يحدث بها الإستجابة للجاذبية الأرضية (Juniper, 1976).

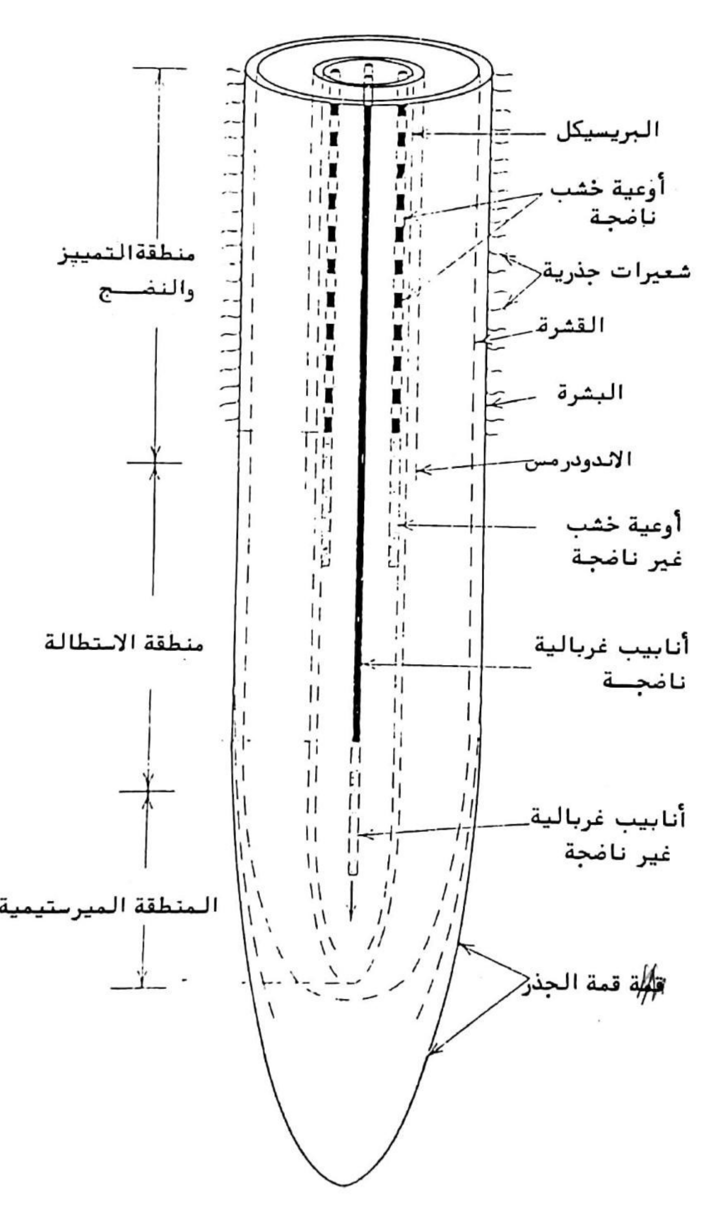
وتقوم المنطقة الميرستيمية، والتي تقع خلف القلنسوة مباشرة، بإنتاج خلايا جديدة بصورة مستمرة، ويدخل بعضها في تكوين منطقة القلنسوة، والبعض الآخر يدخل في تكوين منطقة الإستطالة، ويبلغ طول هذه المنطقة في معظم الحالات حوالي ١مم. وتعتبر هذه المنطقة هي منطقة التكوين الخلوي في الجذر، إذ أن جميع خلايا الجذر تنتج من هذه المنطقة، ولذلك فإنها تساهم بقسط كبير في نمو الجذر في الطول. وأن كمية الماء والأملاح الذائبة الممتصة في هذه المنطقة قليلة نسبيا، ويرجع ذلك إلى نقص الأنسجة التوصيلية في هذه المنطقة.

إن بعض الخلايا، والتي سبق وأن تكونت في المنطقة الميرستيمية، تدخل في تكوين منطقة الإستطالة، والتي توجد أعلى المنطقة الميرستيمية، وفي هذه المنطقة تستطيل الخلايا حديثة التكوين في المنطقةالميرستيمية بسرعة، ويبلغ طول هذه المنطقة عادة ما بين ٢-٥مم، ويعزي إلى هذه المنطقة، معظم النمو الطولي للجذر، وأن إستطالة الخلايا في هذه المنطقة تعمل على دفع الجذر إلى الأمام في التربة.

ويبدأ تمييز كل من الخشب واللحاء في هذه المنطقة، ولكن اللحاء يبدأ في التكشف أقرب إلى القمة النامية للجذر عن الخشب.

إن الخلايا التي تم إستطالتها في منطقة الإستطالة تتميز إلى أنسجة ناضجة في منطقة التمييز والتكشف، إذ تتحول بعض الخلايا إلى بشرة Epidermis، وقشرة Cortex، وعمود وعائي Stele وهذه تكون معا الأنسجة

الناضجة للجذر الحديث، ويبين شكل (٧-١) ترتيب الأنسجة الرئيسية في جذر نبات ذو فلقتين.



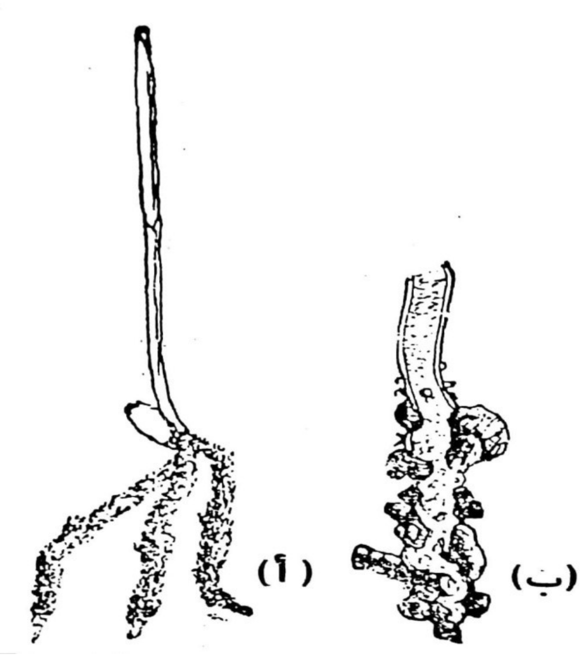
شكل (٧-١). قطاع طولي في قمة جذر نبات الدخان، مبينا المناطق الخارجية للجذر، وترتيب نضج الأنسجة المختلفة.

وتتكون الشعيرات الجذرية بالقرب من الحدود السفلى لمنطقة النضج، وذلك عن طريق نمو أجزاء من خلايا البشرة إلى الخارج.

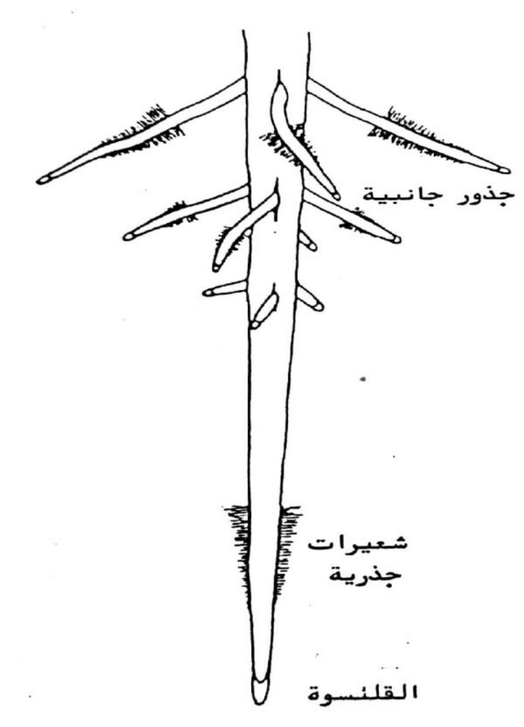
والشعيرة الجذرية عبارة عن خلية أنبوبية رقيقة الجدر وحساسة، حيث تذبل أو تموت خلال بضعة دقائق من تعرضها للهواء الجاف، وهي سهلة التمزق، إذ تنفصل من النبات مباشرة عند نزعه من الأرض.

وتغطي الشعيرة الجذرية من الخارج عادة بمادة لزجة، تسهل إنسيابها بين حبيبات التربة، والإلتصاق بها (شكل ٧-٢)، ولذلك فلا يمكن إقتلاع نبات من الأرض دون إتلافها. وأن الأرض الجافة جدا أو المغمورة بالماء، تعمل على تثبيط تكوين الشعيرات الجذرية، ولا تتكون غالبا على الجذور النامية في مزارع مائية، ويختلف عدد الشعيرات الجذرية في المليمتر المربع من الجذر، إختلافا كبيرا بإختلاف محاصيل الحقل.

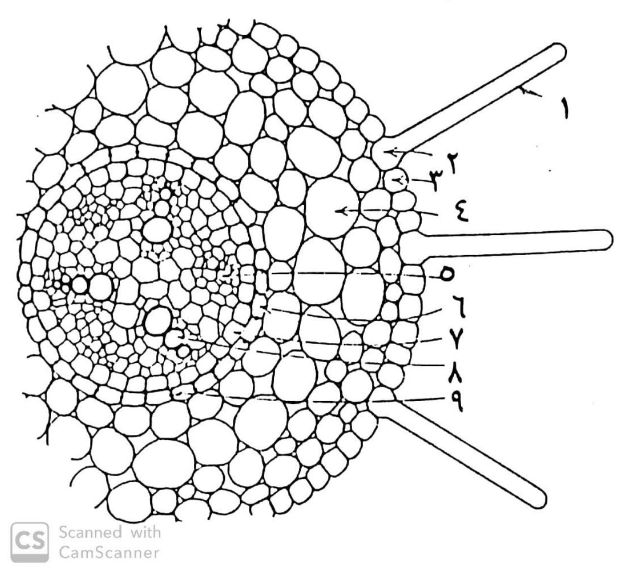
عموما- يتراوح طول الشعيرة الجذرية بين ٠.١٥-٠.٨ مم، وتعمل الشعيرات الجذرية على زيادة السطوح الماصة للجذر، ولذلك فتعتبر منطقة الشعيرات الجذرية، أهم مناطق الجذر من حيث القدرة على إمتصاص الماء والذائبات.



شكل (٧-٢). أ) بادرة قمح، مبينة حبيبات أرضية عالقة بالشعيرات الجذرية، ب) طرف شعيرة جذرية نامية في التربة، وتظهر حبيبات التربة ملتصقة تمام الإلتصاق بسطح الشعيرة الجذرية.



شكل (٧-٣). المجموع الجذري الأولي (الإبتدائي) لبادرة، مبينا موضع تكوين الشعيرات الجذرية والجذور الجانبية.



شكل (٧-٤). قطاع عرضي في جذر حديث: ١- شعيرة جذرية، ٢- خلية الشعيرة الجذرية، ٣- البشرة، ٤- القشرة، ٥- اللحاء، ٦- الإندودرمس، ٧- البريسيكل، ٨- الخشب، ٩- شريط كاسبار.

ويتبين من فحص قطاع عرضي لجذر في منطقة النضج (شكل ٧-٤) وجود عدة أنسجة عالية التميز، فالطبقة السطحية من الخلايا وهي البشرة تنتج الشعيرات الجذرية، ولذلك فهي نسيج ماص، كما تعطي بعض الحماية للخلايا الداخلية، ويلي البشرة نسيج القشرة، وهذه تتكون من خلايا برانشيمية، يوجد بينها مسافات بينية عديدة، تعتبر ذات أهمية من حيث إنتشار الماء والغازات بين خلايا القشرة. ويلي القشرة اللحاء والإندودرمس والخشب.

ويقوم اللحاء بنقل المواد الغذائية المنتجة في الأوراق من الساق إلى الجذر.

إن هذه الأنسجة التي تم ذكرها تعتبر أنسجة إبتدائية Primary tissues إذ أنها تنشأ كلها من المنطقة الميرستيمية بالجذر.

المجموع الجذري في نباتات محاصيل الحقل

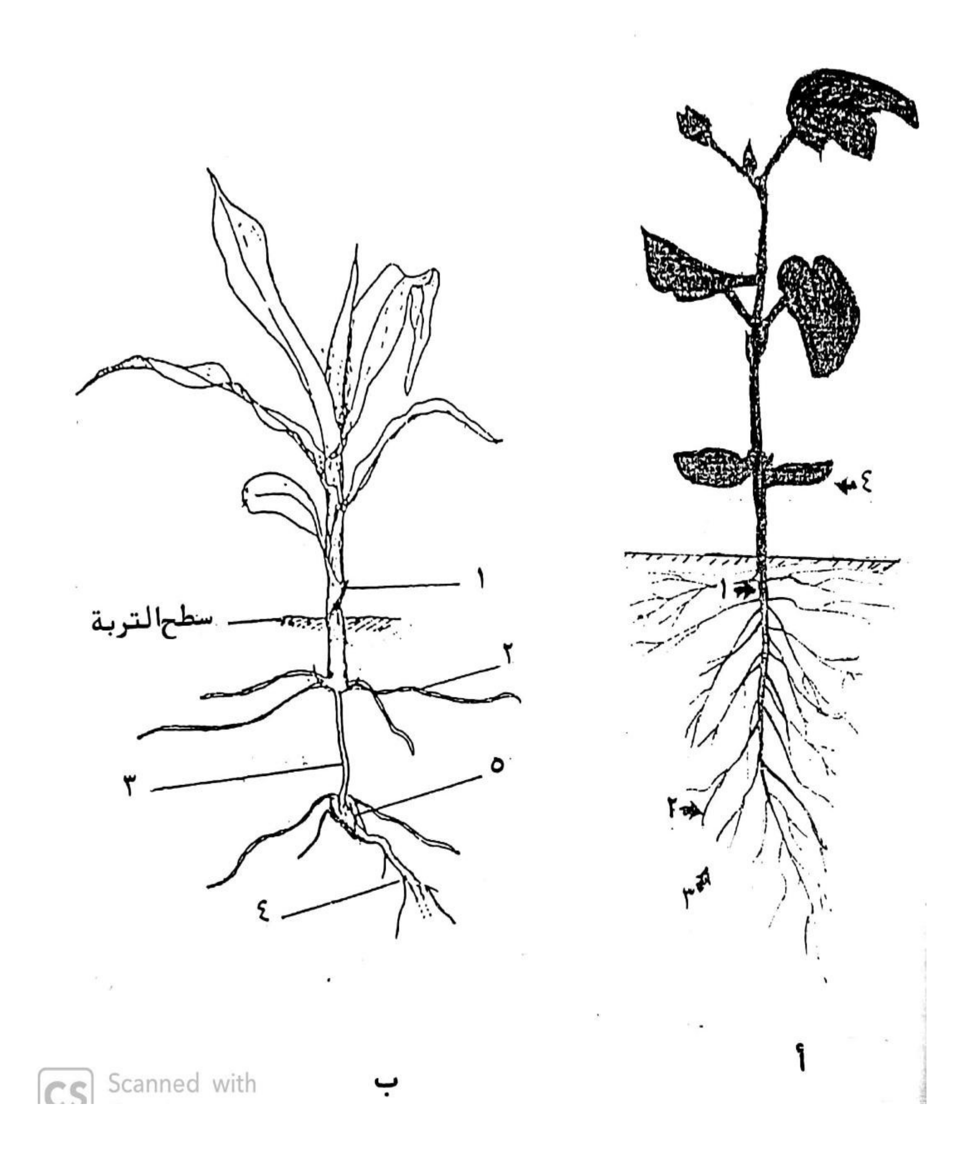
يطلق على الجذر ومكوناته لنبات ما في مرحلة ما من مراحل نموه بالمجموع الجذري Root system، وسوف نوضح فيما يلي وصفا للمجموع الجذري في كل من نباتات محاصيل الحقل ذات الفلقتين، والنباتات ذات الفلقة الواحدة.

أ- المجموع الجذري للنباتات ذات الفلقتين

إن المجموع الجذري في النباتات ذات الفلقتين Dicots أو Dicotyledns، يكون وتدي ويطلق عليه بالمجموع الجذري الوتدي Tap root ويتكون بوجه عام من جذر أولي (إبتدائي) Primary root. ويتكون الجذر الأولي نتيجة لإستمرار نمو الجذير (شكل ٧-٥). ويتفرع الجذر الأولي (الإبتدائي) مكونا جذورا أصغر تسمى الجذور الثانوية Secondary roots ، وهذه الجذور الثانوية تتفرع بدورها إلى جذور أصغر، تسمى بالجذور الثالثة Tertiary roots، وهكذا، وكثيرا ما يطلق على الجذور التي تنشأ من الجذر الأولي بالجذور الجانبية Lateral roots (شكل ٧-٣، ٧-٥).

وفي النباتات البقولية، يستديم الجذر الأولي (الإبتدائي)، حيث يكون الجذر الأساسي للنبات، ويسمى في هذه الحالة بالجذر الوتدي. وأن دقة الجذور الجانبية تتوقف على ترتيب منشئها، وعلى سبيل المثال، تكون الأفرع الجذرية الثالثة أدق (أرفع) من الأفرع الجذرية الثانية.

وهناك بعض الجذور الأولية في بعض النباتات ذات الفلقتين تكون متضخمة كما هو الحال في نباتات بنجر السكر.



شكل (٧-٥). أ) المجموع الخضري والجذري لبادرة نبات عشبي (فول الصويا)، ١- الجذر الأولي (الإبتدائي)، ٢- جذر ثانوي (جانبي)، ٣- جذر ثالثي،
ب) المجموع الخضري والجذري لبادرة نبات نجيلي (الذرة الشامية)، ١- غمد الريشة، ٢- جذر عرضي، ٣- السويقة الجنينية الوسطى (السلامية الأولى)، ٤- الجذور الجنينية.

عموما- ينمو الجذر الأولي (الإبتدائي) رأسيا في التربة، متجها إلى أسفل، ويظهر عليه بوضوح الإنتحاء الأرضي الموجب، أما الجذور الجانبية تكون أقل إستجابة إلى الإنتحاء الأرضي الموجب، وذلك بالمقارنة بالجذر الأولي كما هو الحال في نباتات فول الصويا، ولذلك فإن الزاوية التي تصنعها الجذور الجانبية مع الجذر الأولي تكون زاوية منفرجة، وقد تنمو الجذور الجانبية أفقية، ولا تظهر إنتحاء أرضي موجب، ولكن بتقدم النباتات في العمر فإن الجذور الجانبية التي تتكون يظهر عليها الإنتحاء الأرضي الموجب بدرجة أكبر، إذ تنمو بزاوية حادة مع الجذر الأولي (الأصلي) (Mitchel and Russell, 1971).

ب- المجموع الجذري في النباتات ذات الفلقة الواحدة

إن جذور نباتات ذات الفلقة الواحدة Monocots أو Monocotyledons النجيلية رهيفة ويطلق على هذه الجذور المجتمعة بالمجموع الجذري الليفي Fibrous root system، ويتكون المجموع الجذري الليفي في النباتات النجيلية (شكل ٧-٥) من الجذور الجنينية، والجذور العرضية.

١- الجذور الجنينية Seminal roots

تتكشف الجذور الجنينية مع الجذير من جنين البذرة (شكل (٧-٥)، ولذلك فيطلق عليها "جذور البذرة Seed roots" وأن عدد الجذور الجنينية في القمح يتراوح بين ١-٧ جذور جنينية.

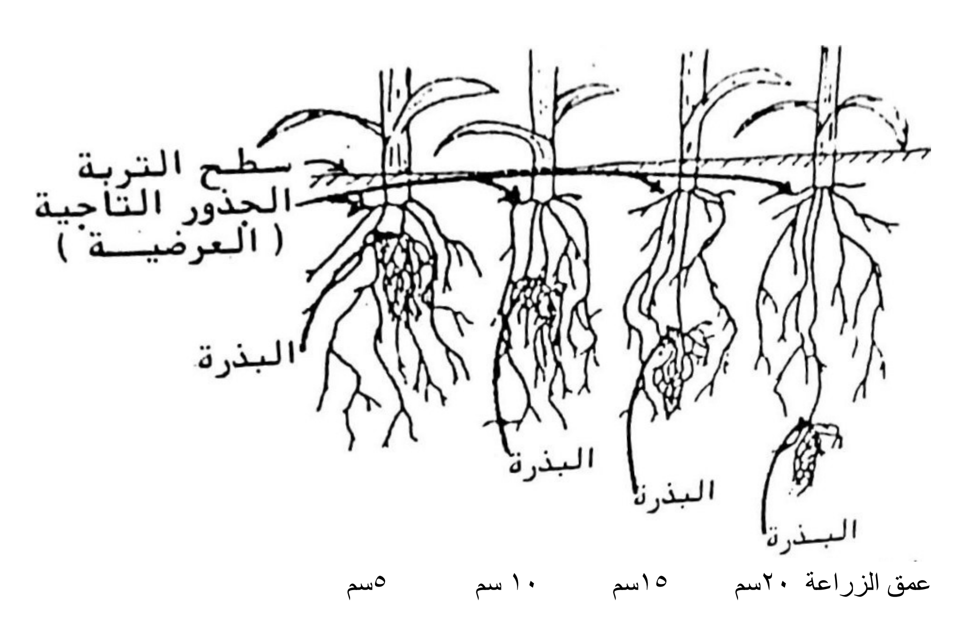
عموما- تختلف النباتات النجيلية المختلفة في عدد الجذور الجنينية التي تكونها. ويبدو أن الإختلاف في عدد الجذور الجنينية يرتبط بالمواءمة للنمو في ظروف بيئية معينة. وهذه الجذور الجنينية تقل أهميتها بعد تكوين الجذور العرضية، ويعتقد البعض أنها قصيرة العمر وتساهم بدرجة قليلة في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية، بينما أظهرت بعض الدراسات أنها تظل قائمة بوظيفتها لفترة طويلة، وتساهم مساهمة كبيرة في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية.

٢- الجذور العرضية Adventitious roots

ويطلق على الجذور العرضية أيضا بالجذور التاجية Crown roots أو Nodal roots أو Coronal roots وتتكشف هذه الجذور من العقد القاعدية للساق في النباتات النجيلية حوالي ٣-٦ عقد متقاربة جدا على الساق أسفل سطح

التربة مباشرة، حيث لا تنمو سلاميات الساق في هذه المنطقة، وهذه العقد تكون "التاج Crown". وتتكون الجذور العرضية على هذه العقد في محيطات مكونة نموا سواريا، ولذلك فيطلق عليها بالجذور التاجية.

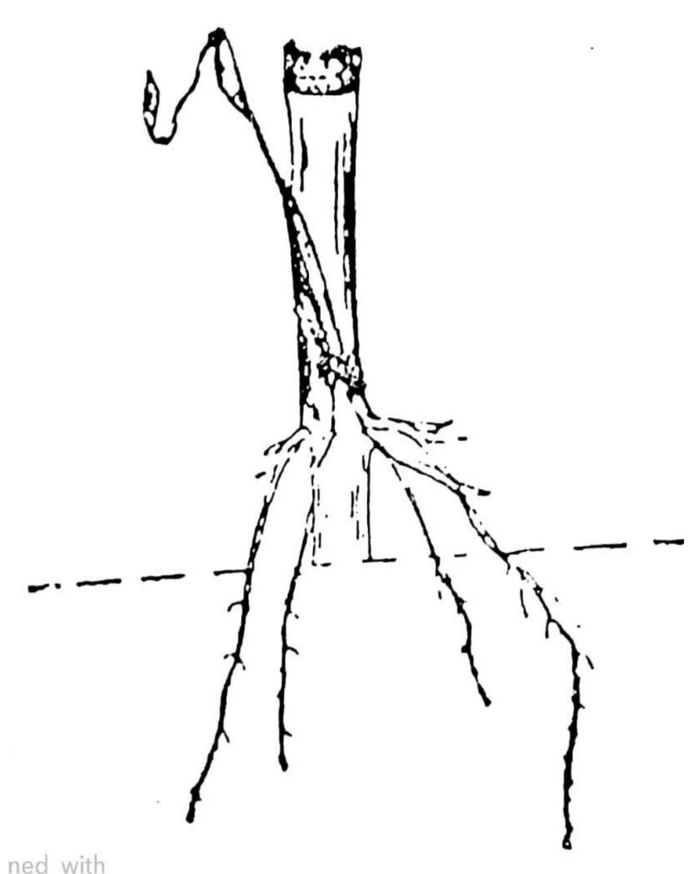
وحيث أن تكشف (ظهور) بادرة النبات النجيلي فوق سطح التربة يكون عن طريق إستطالة السويقة الجنينية الوسطى Mesocotyle (السلامية الأولى) شكل (٧-٥)، فإن منطقة التاج تتكون قرب سطح التربة، بغض النظر عن العمق الذي وضعت عليه الحبة عند الزراعة في التربة (شكل ٧-٦)، وتتوقف السويقة الوسطى عن الإستطالة عند أسفل سطح التربة مباشرة، بسبب آلية تحكم صبغة الفيتوكروم والضوء الأحمر وذلك في غمد الريشة المتكشف.



شكل (٧-٦). حبوب ذرة شامية زرعت على أعماق ٥ن ١٠، ١٥، ٢٠ سم. يلاحظ أن التاج قد تكون على نفس العمق تقريبا أسفل سطح التربة، بغض النظر غن عمق الزراعة.

وفي الذرة الشامية، تتكشف جذورا عرضية من ٤ عقد أو أكثر فوق سطح التربة مباشرة، وهذه الجذور يطلق عليها "الجذور الهوائية أو الدعامية أو المساعدة Prop roots أو Brace roots وهذه الجذور تنمو لأسفل حتى تصل إلى سطح التربة، وعندئذ تأخذ شكل ووظيفة الجذور العادية في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية، علاوة على أنها تقوم بتثبيت النبات في التربة.

وتتميز الجذور الهوائية أو الدعامية بانها أسمك، وأقوى من الجذور العرضية، ولا تتفرع فوق سطح التربة غالبا، وتغطى بطبقة هلامية. ويبين شكل (٧-٧) الجذور الدعامية ومكان نشوئها على الساق في نبات الذرة الشامية.



شكل (٧-٧). الجذور الدعامية في الذرة الشامية ومكان نشوئها من العقد القريبة من سطح التربة.

إن أول حلقة من الجذور العرضية تتكون على اول عقدة في منطقة التاج في النباتات النجيلية، تكون رفيعة ورهيفة، وذات إستجابة موجبة قليلة للجاذبية الأرضية، إذ تنمو لأسفل بزاوية قدرها ٢٥°م من المستوى الأفقي وتتفرع بغزارة، بينما الجذور العرضية التي تتكون بعد ذلك على العقد التالية، تكون أسمك، وذات إستجابة أكبر للجاذبية الأرضية، إذ تنمو إلى أسفل بزاوية قدرها ٤٥°م من المستوى الأفقي، وأن الجذور التاجية (العرضية) التي تتكون في النهاية، تكون أكثر سمكا، وتنمو رأسيا في التربة، وهذه الجذور العرضية السميكة قد تكون أفرعا جذرية رهيفة تتخلل التربة، وتقوم بوظيفتها في الإمتصاص والتدعيم.

كفاءة الجذر في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية

إن الجذور العرضية التي تتكون في حلقات (سوار) بطريقة متتالية على عقد التاج، يؤدي إلى زيادة كفاءة الجذر باستمرار أثناء حياة النبات، حيث أنه بتقدم الجذور في العمر تقل نفاذيتها وكفاءتها.

وعلى الرغم من أن الجذور المسنة هامة للنبات، إلا أن كفاءتها في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية تقل للأسباب الآتية:

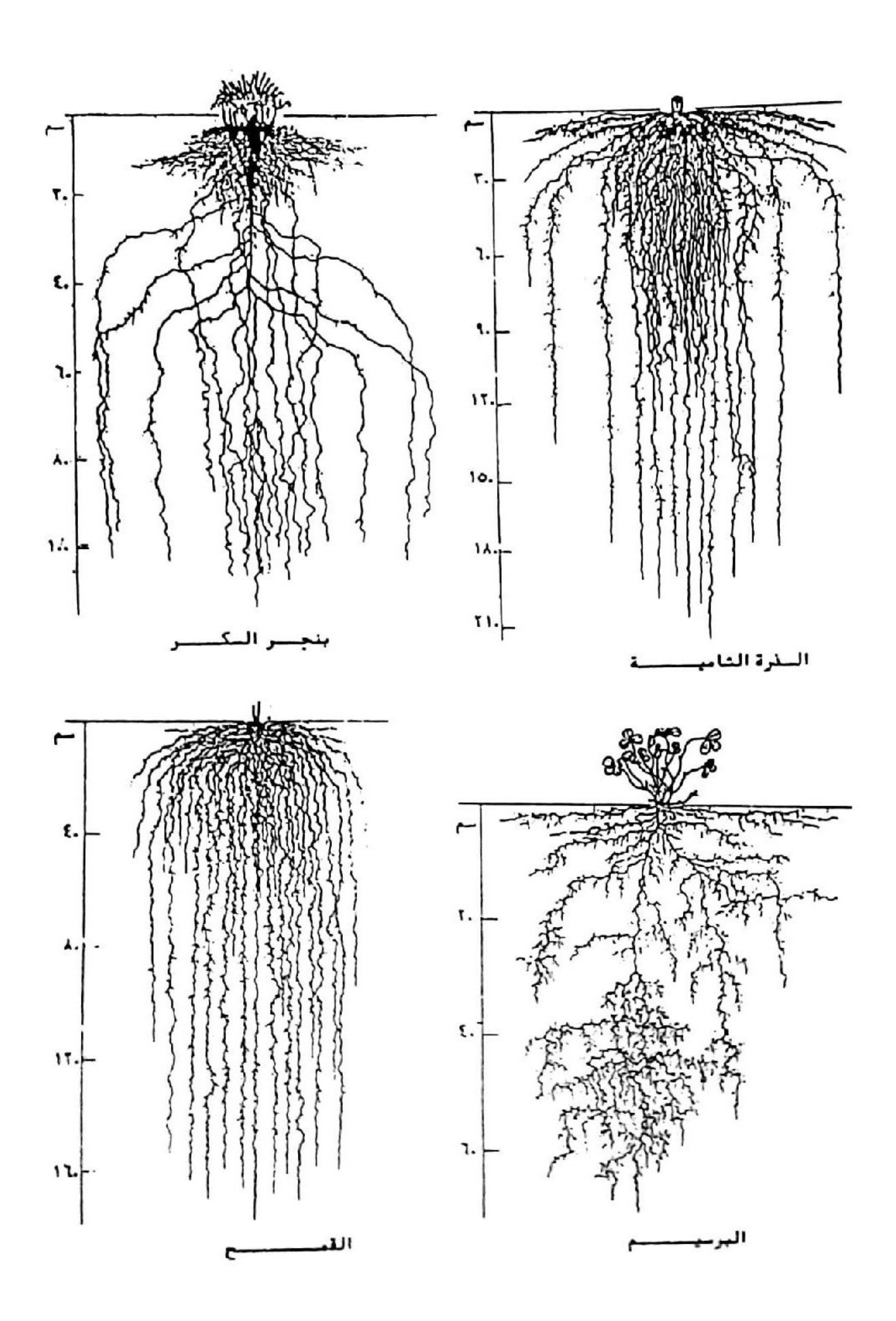
١- لا يوجد عليها شعيرات جذرية،

٢- الجذور المسنة ذات ترسيبات من مواد فينولية،

٣- تحتل الجذور المسنة حجما من التربة قد استنفذ النبات ما به من عناصر غذائية في بداية حياته.

عموما- تتوقف كفاءة المجموع الجذري في إمتصاص الماء والعناصر الغذائية، على عدد الجذور، وطولها، وكثافتها (طول الجذر- سم/ سم تربة)، ومساحة سطح الشعيرات الجذرية.

إن الجذور المتعمقة قد تنمو في طبقات رطبة من التربة غير مستغلة والتي تتميز بمحتوى منخفض من عناصر غذائية معينة، وعلى العكس من ذلك، فإن الجذور الجديدة والأفرع الجذرية، التي توجد قرب سطح التربة تجد محتوى عاليا من العناصر الغذائية، ولكن يكون محتوى الرطوبة منخفض، وحيث أن العناصر الغذائية، وخصوصا النيتروجين والفوسفور تكون مركزة في الطبقة السطحية، فإن النباتات التي تروى على فترات قصيرة لا تحتاج بالضرورة إلى جذور متعمقة.



شكل (٧-٨). المجموع الجذري لنباتات بنجر السكر، والذرة الشامية، والقمح والبرسيم (عن: Kutschera، عام ١٩٦٠).

امتداد وتعمق الجذور في التربة

إن الميرستيمات الجذرية قادرة على الإستمرار في النمو الغير محدود والذي يؤدي إلى إمتداد الجذور لفترات غير محدودة، وقد يستمر النمو طول موسم النمو، وقد يصل إمتداد الجذور إلى ٢م أو أكثر في نهاية موسم النمو في بعض نباتات المحاصيل. ويبين شكل (٧-٨) المجموع الجذري لنباتات بنجر السكر، والذرة الشامية، والقمح، والبرسيم، وذلك قرب مرحلة نضج النباتات، ويلاحظ أنها جميعا (ماعدا البرسيم) تتعمق في التربة لعمق ١م على الأقل. ولقد وجد في بعض النباتات النجيلية (Agropyron) الذي ينمو في المناطق الجافة، تستطيل الجذور بمعدل قدره ١٥سم/ أسبوع. ولقد وجد أنه بعد ٤٩ يوما من الزراعة قد ظهرت إختلافات كبيرة في الطول الكلي للجذر بين الأنواع المختلفة، وأن إختلاف طول المجموع الجذري بين الأنواع المختلفة، تعكس الإختلاف بين الأنواع المختلفة في تحملها للجفاف (Kittock and Pattarson, 1959).

وأن معدل نمو الجذور، يزداد في بداية حياة النبات ثم ينخفض بعد ذلك. وقد يرجع نقص نمو الجذور في نهاية حياة النبات، إلى شيخوخة الأجزاء الخضرية، وزيادة معدل إنتقال ناتجات التمثيل الضوئي إلى الثمار، ونقص معدل إنتقالها إلى الجذور، وهذا يؤدي إلى نقص معدل نموها في هذه المرحلة من حياة النبات.

وأن نجاح النباتات المنزرعة، والمعرضة للجفاف، يعتمد غالبا على تكوين مجموع جذري متعمق وغزير التفريع، والذي يمتص الماء من حجم كبير من التربة، ولذلك فإن المحاصيل ذات الجذور السطحية، مثل البصل تعاني من الجفاف بدرجة أكبر بالمقارنة بالمحاصيل ذات المجموع الجذري المتعمق مثل البرسيم الحجازي، والذرة الرفيعة، والذرة الشامية وغيرها.

ويمكن القول أن صفة تعمق الجذور تعتبر عاملا هاما في مقاومة النباتات للجفاف في كثير من النباتات، وخصوصا النجيليات العشبية (Burton, 1954)، وأنه يمكن التربية والإنتخاب للتراكيب الوراثية ذات المجموع الجذري الأكثر تعمقا في التربة. ولقد وجد المؤلف، ١٩٨٥، في الذرة الرفيعة الحبوب، أن التراكيب الوراثية ذات المجموع الجذري الكبير والمتعمق، كانت أكثر تحملا للجفاف من مثيلتها ذات المجموع الجذري الصغير والغير متعمق في التربة.

ويرجع إختلاف تعمق المجموع الجذري للأصناف أو الأنواع النباتية المختلفة جزئيا إلى الإختلاف في درجة تحمل الجذور لنقص الأكسجين بزيادة

عمق التربة، كما يرجع أيضا إلى مقدار تركيز وفعل كل من الأكسينات والجبريلينات.

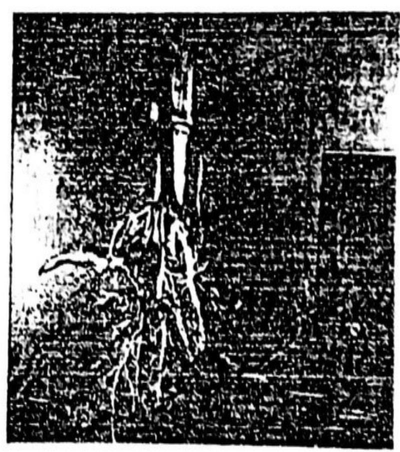
عموما- يعتبر تعمق الجذور هاما بالنسبة لمحاصيل الحقل وخصوصا عند نقص الإمداد المائي.

العوامل المؤثرة على نمو وإنتشار الجذور

إن طبيعة نمو الجذور تعتبر صفة وراثية، ولكنها تتأثر تأثرا كبيرا بالظروف البيئية، وخصوصا الظروف الأرضية المحيطة بالجذور، وأهمها رطوبة التربة، ودرجة حرارة التربة، ومحتوى التربة من العناصر الغذائية، وتهوية التربة، ورقم حموضة التربة، والمواد السامة في بيئة الجذور. كما يتأثر نمو الجذور بالتنافس بين النباتات، وحش أو تقليم أو قص المجموع الخضري.

١- التركيب الوراثي Genotype

توجد إختلافات كبيرة في المجموع الجذري بين التراكيب الوراثية المختلفة لمحصول ما، وهذه الإختلافات تعطي فرصة التربية والإنتخاب لصفات الجذور وأن معظم صفات الجذور صفات كمية، أي يتحكم فيها عدد من الجينات. وعلى الرغم من أن طبيعة نمو المجموع الجذري لبادرات العديد من الأنواع النباتية، يتحدد بالصفات الوراثية، إلا أنه يتأثر بعد ذلك بتفاعل العوامل الوراثية مع العوامل البيئية النامي فيها المجموع الجذري. وأن تأثير العوامل الوراثية في التحكم في حجم وطبيعة إنتشار المجموع الجذري، يظهر عند زراعة عدد من الأنواع النباتية في نفس التربة وتحت نفس الظروف البيئية (شكل ٧-٨). كما وجد أن أصناف المحاصيل المختلفة تختلف عن بعضها في حجم مجموعها الجذري وطبيعة إنتشاره. ويبين شكل (٧-٩) المجموع الجذري لسلالتين من الذرة الشامية، مبينا مدى التباين الوراثي الكبير في المجموع الجذري داخل النوع الواحد.

شكل (٧-٩). سلالتان من الذرة الشامية مختلفتان في المجموع الجذري.

٢- الهواء الأرضي Soil atmosphere

تعتبر تهوية التربة عاملا محددا لنمو الجذور والقيام بوظيفتها في الأراضي الغير مشبعة بالماء، ويتسبب نقص تهوية التربة عادة عن طريق الغمر بالماء، أو إرتفاع مستوى الماء الأرضي. وأن عملية تتنفس الجذور والكائنات الحية الدقيقة بالتربة، تستخدم كميات كبيرة من الأكسجين وتنتج كميات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون، وخصوصا أثناء الصيف ولذلك فإن الهواء الأرضي المحيط بالجذور يختلف لحد ما عن الهواء الجوي المحيط بالمجموع الخضري، وأن محتوى الهواء الأرضي بوجه عام من ثاني أكسيد الكربون أعلى منه في الهواء الجوي، والعكس من ذلك في حالة الأكسجين. إذ أن تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الهواء الأرضي يبلغ بضع مئات من المرات من تركيزه الموجود في الهواء الجوي العادي، وينقص تركيز الأكسجين تبعا لذلك إلى ما لا يزيد عن ١٠-١٢% مقابل ٢٠% الموجود في الهواء الجوي العادي.

ويؤدي سوء التهوية حول جذور النباتات إلى:

أ- نقص إمتصاص الماء والعناصر الغذائية، إذ يعتبر الأكسجين ضروريا لعملية الإمتصاص النشط للماء والعناصر الغذائية. ولقد وجد أن إمتصاص الماء الأرضي بواسطة جذور نباتات الشعير قد زاد بزيادة تركيز الأكسجين فس بيئة الجذور (Laty, *et.al,* 1965)،ويرجع ذلك إلى زيادة معدل الإمتصاص النشط، وتنشيط تكوين جذور جديدة. وعلى العكس من ذلك، فإن بعض المحاصيل مثل الأرز، يمكنها إمتصاص كميات مناسبة من الأكسجين عن طريق الأوراق ونقله إلى الجذور عن طريق الأنسجة الإيرنشيمية Aerenchyma والتي تتكون من خلايا تكثر بينها المسافات البينية، وقد تتسع تلك المسافات، مكونة فراغات واسعة ممتلئة بالهواء والأنسجة الإيرنشيمية، تسمح بإنتشار الغازات داخل أعضاء النبات، وكذلك بالإنتشار السريع للأكسجين المتكون في عملية التمثيل الضوئي من الورقة إلى الأنسجة التي تقوم بعملية التنفس وتحتاج إلى الأكسجين وأهمها الجذور، ولذلك ففي مثل هذه النباتات ليس من الضروري أن يكون الأكسجين موجودا دائما في بيئة جذورها.

ب-تؤدي سوء التهوية في منطقة نمو الجذور إلى نقص نمو الجذور، نتيجة لنقص الأكسجين اللازم لتنفسها، ونتيجة أيضا إلى نقص إمتصاص الماء والعناصر الغذائية.

جـ- تؤدي التهوية الرديئة إلى تجمع ناتجات التنفس اللاهوائي السامة حول الجذور، ومن هذه المواد الإيثانول، والألدهيدات، وبعض الأحماض العضوية، مثل حمض اللاكتيك والسيتريك وغيرها، كما تتجمع أيضا أكاسيد الحديدوز وبعض المعادن الأخرى حول جذور النباتات في الأراضي المغمورة بالماء، وهذه تسبب ضررا للجذور.

د- يؤدي سوء التهوية (نقص الأكسجين) إلى نقص نشاط الكائنات الحية الدقيقة والتي تؤثر بدورها على يسر العناصر الغذائية للجذور.

٣- تأثير حموضة التربة (pH)

إن pH التربة خارج المجال من ٥-٨، ذو تأثيرا مباشرا على الحد من نمو الجذور، بينما يكون تأثير الـpH في هذا المجال (كما هو موجود تحت معظم ظروف الأراضي المنزرعة بمحاصيل الحقل) عادة غير مباشر. وأن رقم pH المنخفض (الأقل من٦) يؤدي إلى زيادة الألومنيوم والحديد والمنجنيز الذائبة بدرجة تكون سامة وتحد من جذور النباتات.

٤- درجة الحرارة

إن درجة الحرارة المثلى لنمو الجذور، أقل عادة من مثيلتها لنمو المجموع الخضري، كما تختلف درجة الحرارة المثلى لنمو الجذور إختلافا كبيرا باختلاف الأنواع النباتية، وطور النمو، وتركيز الأكسجين، وتتراوح بوجه عام بين ٢٠-٢٥°م. ولقد وجد أن نمو الجذور يتحدد أو يتوقف بواسطة درجة الحرارة المنخفضة، وأحيانا تصبح درجة حرارة الطبقة السطحية من التربة عالية لدرجة يثق عندهانمو الجذور. وأن جذور الأنواع النباتية التي تنمو في المناطق الدافئة تتوقف عن النمو في درجات حرارة مرتفعة، عن مثيلتها التي تنمو في المناطق الباردة.

٥- خصوبة التربة Soil fertility

تحتاج جذور النباتات إلى كمية مناسبة من العناصر الغذائية لنموها وتكشفها، كما هو الحال في أعضاء النبات الأخرى، ومظرا إلى أنها هي الأقرب إلى مصدر العناصر المعدنية والماء عن المجموع الخضري، فإن الجذور يكون لها الأولوية للحصول على الماء والعناصر المعدنية، على الرغم من أن فرصتها تكون الأخيرة في الحصول على ناتجات التمثيل الضوئي من المجموع الخضري، ولهذا السبب يكون تأثير نقص الماء والعناصر المعدنية على الجذور أقل من تأثيره على المجموع الخضري (نقص نسبة المحموع الخضري إلى المجموع الجذري).

عموما- يؤدي التسميد إلى تشجيع نمو الجذور. ولقد وجد أن جذور الذرة الشامية يزداد نموها وتفرعها في المناطق من التربة التي تحتوي على مادة عضوية وسماد، وخصوصا إذا إحتوى السماد على نيتروجين وفوسفور. ولقد وجد أن الذرة الشامية المسمدة تعمقت جذورها لعمق قدره ١.٧م بالمقارنة بمثيلتها التي لم تسمد، والتي تعمقت جذورها ١.٤م (Fehrenbacher, *et.al,* 1969).

إن زيادة مستوى التسميد النيتروجيني يؤدي إلى زيادة نشاط نمو المجموع الخضري إلى الجذري، كما سبق أن أوضحنا في الباب الرابع، وبالإضافة إلى ذلك فإن زيادة التسميد الأزوتي المضاف تؤدي إلى زيادة مستوى الأكسين ، والتي قد تثبط نمو الجذور.

عموما- يؤدي التسميد الأزوتي إلى زيادة وزن الجذور، إذ وجد أن نباتات الذرة الشامية المسمدة بالنيتروجين، تكون ذات مجموع جذري أكبر، وتستعمل كمية مياه أكبر تحت ظروف الجفاف بالمقارنة بمثيلتها الغير مسمدة. وقد

يرجع ذلك إلى أن التسميد الأزوتي عند الزراعة يعمل على تشجيع تعمق وانتشار الجذور في بداية موسم النمو، وقد يرجع ذلك إلى زيادة مساحة السطح الورقي، وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة معدل إنتقال ناتجات التمثيل الضوئي إلى الجذور.

إن النباتات المسمدة بالفوسفور تكون جذورا أكبر عن مثيلتها التي لم تسمد، ويبدو أن هذا التأثير يرجع إلى تأثير الفوسفور على زيادة التمثيل الضوئي، وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة نمو الجذور، ولقد وجد أن الفوسفور يسبب زيادة معدل تكوين الشعيرات الجذرية.

ولقد وجد بوجه عام، أن تأثير العناصر السمادية الأخرى على نمو الجذور يكون غير مباشر، وتؤدي إلى زيادة نمو الجذور فقط بعد زيادة نمو المجموع الخضري.

٦- الماء

يعتبر الماء ضروريا لنمو الجذور، بدليل أن الجذور لا يمكنها أن تنمو في الطبقات الجافة من التربة، وعلى أي حال، يؤدي الإجهاد المائي إلى نقص كبير في وزن الجذور في الذرة الرفيعة (المؤلف، ١٩٨٥)، وطول الجذر في فول الصويا (Sivakumar, *et.al.* 1977).

٧- التنافس بين النباتات Root Competition

إن حجم المجموع الجذري لنبات ما يقل كثيرا، عندما يكون هناك تنافس بينه، وبين المجموع الجذري لنبات آخر، وعلى سبيل المثال قد وجد أن جذور القمح والشعير، كانت أكبر بمقدار ١٠٠ مرة تقريبا، عندما زرعت بمعزل عن بعضها البعض (بدون منافسة)، عما لو زرعت في سطور تبعد عن بعضها بمقدار ١٥سم. كما وجد أيضا أن زيادة كثافة نباتات القمح والذرة الشامية، تؤدي إلى نقص الطول الكلي للجذور المتكونة في القمح.

إن القدرة التنافسية لنوع نباتي معين، ترجع إلى إفراز الجذور لمواد سامة Toxines أو مواد مثبطة، تعمل على تثبيط نمو جذور النباتات الأخرى النامية معها، ولكنها لا تؤثر على نمو جذور نفس النباتات، وتعرف هذه الظاهرة بـ"Allelopathy".

٨- تأثير المجموع الخضري على الجذور Effect of shoots on roots

نظرا إلى أن المجموع الجذري يعتمد على المجموع الخضري في إمداده بناتجات التمثيل الضوئي، فإن التظليل أو نقص مساحة السطح الورقي أو الحش، او الرعي، أو التقليم، أو قص المجموع الخضري، يؤدي إلى نقص نمو ووزن المجموع الجذري. ولقد وجد أن الرعي الجائر، وكذلك الحش على فترات متقاربة جدا لنباتات العلف الأخضر، تؤدي إلى نقص الوزن الجاف للجذور بمقدار ١٠%، (Kramer, 1983).

٩- الدورة الزراعية Crop rotation

الدورة الزراعية، هي نظام تعاقب المحاصيل في منطقة من الأرض ووجد أن تعاقب المحاصيل في دورة زراعية، يؤدي إلى زيادة نمو جذور النباتات إذ أن الدورة الزراعية، تعمل على تقليل إنتشار الحشائش والآفات، وتحسن محتوى التربة من النيتروجين، عن طريق زراعة المحاصيل البقولية.

ولقد وجد أن هناك محاصيل معينة لا تجود بعد محاصيل أخرى سابقة لها في الدورة الزراعية، إذ وجد أن بعض النباتات تنتج جذورها مواد سامة عند تحللها في التربة بعد حصاد المحصول، وهذه المواد السامة الناتجة تسبب تثبيط نمو جذور النباتات التالية لها في الدورة الزراعية.

١٠- القوى الميكانيكية والطبيعية للتربة

يواجه نمو الجذور في التربة مقاومات ميكانيكية مختلفة منها، مقاومة حبيبات التربة، وتماسك حبيبات التربة، ونقص نفاذية التربة نتيجة نقص تجمع حبيبات التربة ونقص الفجوات الهوائية بالتربة، وكبس التربة Compaction. ويؤدي هذا كله إلى نقص تهوية التربة ونقص نمو الجذور، وإمتصاص الماء والعناصر الغذائية نتيجة لنقص الأكسجين.

١١- فطريات الجذور Mycorrhizae

إن جذور معظم الأشجار والنباتات العشبية يرتبط بها وينمو عليها أنواعا متخصصة من الفطريات، يطلق عليها "فطريات الجذور". ويوجد طرازين من هذه الفطريات هما: الطراز الخارجي Ectotrophic والطراز الداخلي Endotrophic. وأن الطراز الأخير هو الذي ينمو على جذور نباتات محاصيل الحقل، وفيه يكون الفطر شبكة مفككة من الهيفات بين خلايا البشرة والقشرة

للجذر وتمتد حتى تشمل سطح الجذر، وكذا سطح حبيبات التربة المجاورة للجذر.

وتعتبر العلاقة بين فطريات الجذور والنباتات التي ترتبط بها غالبا علاقة تعاونية (تبادل المنفعة) أي مفيدة لكل من العائل والفطر، حيث يحصل الفطر على المواد الغذائة الممثلة من النبات العائل، ويستفيد النبات العائل من الفطر بطرق مختلفة، إذ يؤدي وجود فطريات الجذور إلى زيادة السطح الماص للجذر، نتيجة لوجود هيفات الفطر التي تمتد من الجذر إلى التربة، كما تعمل فطريات الجذور على زيادة إمتصاص العناصر المعدنية بواسطة جذور النبات، كما تعمل أيضا على تسهيل حركة الماء من التربة، كما أنها تعمل على تسهيل نقل الفوسفور من نبات لآخر (Heap and Newman, 1980).

ولقد وجد أن إجراء عدوى للتربة بواسطة فطريات الجذور، تعمل على زيادة نمو النباتات المنزرعة (Russell, 1977).

الباب الثامن

البذور والإنبات

تعتبر البذور ضرورية لحياة وبقاء الإنسان، ولقد قام الإنسان في عصور ما قبل التاريخ في اختيار بذور النباتات البرية التي وجد فيها ما يحتاجه من طعام مقبول ومستساغ، وبدأ بجمعها وتخزينها، بغرض استعمالها في غذائه، وزراعتها من جديد للحصول على بذورها وهكذا. وأن ظهور الحضارات القديمة، كان مرتبطا بانتاج محاصيل الحبوب، وخصوصا القمح والشعير في الشرق الأوسط، والأرز في جنوب شرق آسيا، والذرة الشامية في أمريكا الشمالية والجنوبية.

وتعتبر البذور في الوقت الحاضر مصدرا رئيسيا للغذاء، والمشروبات ومادة خام لعديد من الصناعات.

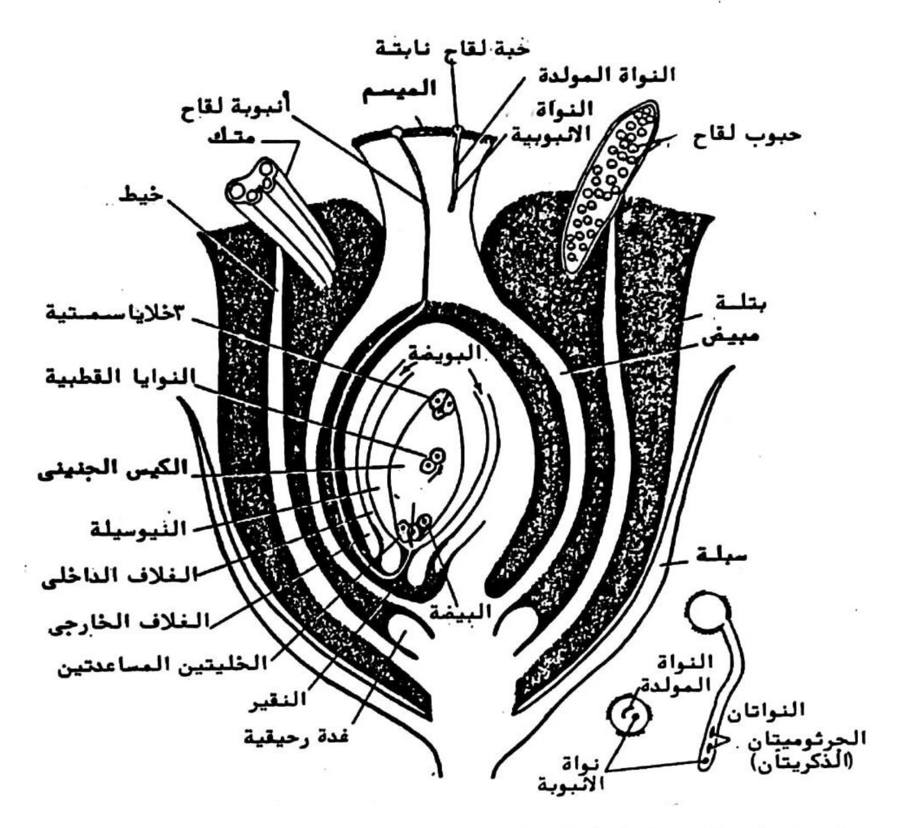
ولكي تتكون البذور على النبات، فلابد أولا من تكوين حبوب اللقاح (الجاميطات المذكرة) في المتك، وتكوين البويضات (الجاميطات المؤنثة) في مبيض الزهرة، ثم يحدث التلقيح والإخصاب. وسوف نوضح فيما يلي تركيب الزهرة، وعملية التلقيح والإخصاب، وتكشف البذرة.

تركيب الزهرة

الزهرة هي العضو من النبات الذي يحمل أعضاء التكاثر في النباتات الزهرية، وتتخصص في تكوين البذور والثمار، ولا تتكون الثمار والبذور في أي جزء آخر من النبات. ولقد اتخذت الزهرة أساسا لتقسيم النباتات الزهرية إلى رتب وفصائل وأجناس وأنواع، لأنها العضو الثابت التركيب في النبات، ولا يتأثر تركيبها بالبيئة التي تعيش فيها النباتات.

الزهرة من الناحية المورفولوجية، عبارة عن ساق (فرع) قصيرة متحورة ذات نمو محدود، قصرت سلامياتها وتقاربت أوراقها، وتحورت لأداء وظيفة

خاصة هي التكاثر الجنسي. ولقد أدى تطور النباتات الزهرية إلى ظهور عدد كبير من الأشكال الزهرية المختلفة التي توجد بين النباتات الزهرية النموزجية. وتتكون الأزهار ماعدا شواذ قليلة نسبيا، من نفس الأجزاء، إلا أنها تختلف في عدد هذه الأجزاء وترتيبها وشكلها، ويبين شكل (٨-١) تركيب زهرة نموزجية.



شكل ٨ - ١ شكل تخطيطى لقطاع طولى فى زهـــــرة نموزجيـة مبينا الأجزاء المختلفة للزهـرة .

وتتكون الزهرة من أربعة أجزاء مرتبة عادة في حلقات متتالية، وهذه الأجزاء هي: الكأس والتويج والطلع وامتاع. ويطلق على الكأس والتويج بالمحيطات الزهرية الغير أساسية، بينما يطلق على الطلع والمتاع بالمحيطات الزهرية الأساسية.

١- الكأس Calyx

يعتبر الكأس أول المحيطات الزهرية، ويتكون من عدد من السنيبلات Sepals، والسبلات لونها أخضر عادة، وقد تتلون بألوان مختلفة.

ويقوم الكأس بحماية وحفظ الأجزاء الزهرية الأخرى وفي البرعم الزهري من العوامل الخارجية، وقد يكون للكأس وظائف أخرى ثانوية مثل حماية الثمرة النامية بعد الإخصاب.

٢- التويج Corolla

التويج يلي الكأس مباشرة، ويتكون من عدد من البتلات Petals الملونة عادة. ووظيفة التويج الأساسية هي جذب الحشرات للزهرة لإتمام عملية التلقيح، كما يحمي أيضا الأعضاء الزهرية الداخلية.

ويطلق على الكأس والتويج بالغلاف الزهري Perianth إذا تشابها أو إذا غاب أحدهما.

٣- الطلع Androecium

الطلع هو عضو التذكير في الزهرة، ويتركب من عدد من الأسدية Stamens وتتركب السداة من خيط طويل Filament، ومتك Anther، ويعمل الخيط على وضع المتك في الوضع الملائم لانتثار حبوب اللقاح، ولذلك فيختلف شكله طبقا لطريقة التلقيح، وقد تكون الأسدية منفصلة أو ملتحمة بخيوطها. وقد تترتب الأسدية في محيط واحد أو أكثر، متوقفا ذلك على نوع النبات. ويتركب المتك عادة من فصين Lobes، ويحتوي كل فص على كيسين لحبوب اللقاح Pollen sacs توجد بداخلها حبوب اللقاح Pollen Grains ، وقد يتكون المتك من فص واحد في بعض العائلات النباتية.

٤- المتاع Pistil (Genoecium)

المتاع هو عضو التأنيث في الزهرة، ويتركب من كربلة واحدة أو عدد من الكرابل المنفصلة أو الملتحمة، وتتركب الكربلة Carpel من:

أ- **المبيض Ovary**، هو الجزء المتسع الموجود عند قاعدة الكربلة، والذي يصبح الثمرة بعد التلقيح والإخصاب. وتوجد داخل المبيض البويضات Ovules، والتي تتكون على جدار المبيض، وهذه تعطي البذور عند تكشفها، وتسمى منطقة اتصال البويضة بجدار المبيض بالمشيمة Placenta. وتصل

البويضة بالمشيمة بواسطة الحبل السري Funicle، الذي يترك مكانه، والذي يسمى بالسرة Hilum عند نضج البذرة وانفصالها.

ب-**القلم Style.** وهو عبارة عن جزء رفيع مستطيل ينشأ من قمة المبيض، وتنمو خلاله الأنبوبة اللقاحية.

جـ الميسم Stigma. وهو عبارة عن قمة القلم المتسعة التي تستقبل حبوب اللقاح وانباتها عليه عند التلقيح، وقد يتحور الميسم ليلائم هذه الوظيفة.

الجنس في الزهرة

تقسم ازهار المحاصيل من حيث الجنس إلى:

١-زهرة خنثى Hermaphrodite أو ثنائية الجنس Bisexual

وهذه تحتوي على أعضاء التذكير والتأنيث معا كما هو الحال في القمح والقطن والفول وغيرها.

٢-زهرة وحيدة الجنس Unisexual

هي الزهرة التي تحتوي على أحد الأعضاء الجنسية فقط وهذه تقسم إلى:

أ- **زهرة مؤنثة Pistillate (Femal) flower** وهذه تحتوي على المتاع (عضو التأنيث) فقط، كما هو الحال في نباتات الذرة الشامية حيث توجد الأزهار المؤنثة في النورة المؤنثة (الكوز Ear).

ب-**زهرة مذكرة Stiminate (Male) flower** وهذه تحتوي على الطلع (عضو التذكير) فقط، كما هو الحال في نباتات الذرة الشامية حيث توجد الأزهار المذكرة في النورة المذكرة Tassel التي تحمل في قمة النبات.

وإذا وجدت الأزهار المذكرة والمؤنثة على نفس النبات سمي النبات أحادي المسكن Monoecious كما هو الحال في الذرة الشامية.

أما إذا وجدت الأزهار المذكرة على نبات والأزهار المؤنثة على نبات آخر، سمي النبات ثنائي المسكن Dioecious كما في نخيل البلح.

وتحمل أجزاء الزهرة السابق ذكرها على التخت الزهري Receptacle الذي يوجد على حامل (عنق) الزهرة Pedicle ، وتكون الزهرة في هذه الحالة معنقة، وقد لا يوجد الحامل الزهري فتصبح الزهرة جالسة.

وتوجد الزهرة مفردة على النبات، أو توجد في مجاميع تسمى النورة.

التلقيح Pollination

هو عبارة عن انتقال حبوب اللقاح من المتك إلى المياسم، وقد يكون التلقيح ذاتيا Self pollination أو خلطيا Cross pollination. والتلقيح الذاتي هو انتقال حبوب اللقاح من المتك إلى ميسم نفس الزهرة، أو إلى ميسم زهرة أخرى على نفس النبات، أما التلقيح الخلطي فهو انتقال حبوب اللقاح من متك الزهرة إلى ميسم زهرة أخرى على نبات آخر من نفس الصنف أو النوع، أو من نوع متقارب، أو من جنس آخر متوافق معه.

الإخصاب Fertilization

الإخصاب هو اندماج النواه الذكرية مع نواة البيضة. وتبدأ عملية الإخصاب بانبات حبة اللقاح على الميسم وتكوين أنبوبة لقاح تخترق سطحه، ثم يستمر نموها خلال أنسجة القلم حتى تصل إلى نقير البويضة. ثم تخترق أنبوبة اللقاح النيوسيلية، ثم جدار الكيس الجنيني، وفي هذه الأثناء يزول الجزء الطرفي من أنبوبة اللقاح، وتختفي نواة الأنبوبة، وعند دخول النواتان الذكريتان الكيس الجنيني، تتحد إحداهما بالبيضة (الجاميطة المؤنثة) ويتكون الزيجوت Zygote، والذي يكون فيما بعد الجنين ويحتوي على (٢ن) من الكروموسومات، وتتحد النواة الذكرية الثانية مع النواتين القطبيتين، وتسمى النواة الناتجة من هذه النويات الثلاث "نواة الإندوسبرم Endosperm nucleus" والتي تحتوي على (٣ن) من الكروموسومات، والتي بانقسامها عدة مرات يتكون نسيج الاندوسبرم الذي يختزن داخله الغذاء اللازم لنمو الجنين.

ويكون تكشف كل من الجنين والاندوسبرم على حساب النيوسيلة، إذ يهضم جزءا منها حيث يستمد منها كلا من الجنين والاندوسبرم الغذاء اللازم لتكشفهما، مما يترتب عليه أن يمتص نسيج النيوسيلة كله أثناء نمو الجنين في بعض النباتات، أو قد توجد في بعض البذور في صورة طبقة رقيقة من خلايا تسمى البريسبرم Perisperm مضغوطة تحت قصرة البذرة.

تكشف البذرة

البذرة هي البويضة المخصبة، فبعد عملية الاخصاب تنمو أغلفة البويضة، مكونة قصرة البذرة، كما ينمو جدار المبيض مكونا الغلاف الثمري، وعندما يتم نضج البذرة، تجف ويبقى الجنين في حالة سكون حتى تتهيأ له ظروف الانبات.

وتعتبر البذرة هي حلقة الاتصال الحية بين الآباء والنسل، كما تعتبر أيضا هي الوسيلة الرئيسية للانتشار. وتتميز البذور بقدرتها على بقائها حية تحت الظروف البيئية المعاكسة، مثل درجة الحرارة المنخفضة، والغمر بالماء وتناولها بواسطة الإنسان والحيوانات.

وأن النباتات التابعة للعائلة النجيلية، وبعض النباتات ذات الفلقتين لا تنتج بذورا حقيقية True seeds، ففي النباتات النجيلية تتكون ثمرة جافة غير متفتحة ناتجة من مبيض واحد تسمى برة Caryopsis وفيها يلتحم الغلاف الثمري Pericarp (جدار المبيض) والقصرة (جدار البويضة) معا ليكونا غلاف الحبة.

إن بذور بعض النباتات الأخرى مثل زهرة الشمس، لا يلتحم فيها الغلاف الثمري بالقصرة، ولذلك تتكون ثمرة غير متفتحة بها بذرة واحدة يطلق عليها "فقيرة أو أكين Achene) وتكون البذرة سائبة داخل الغلاف الثمري، ويمكن فصلها بسهولة.

وفي البنجر تكون الثمرة متجمعة جافة Aggregate fruit تنتج عن زهرة واحدة ذات كرابل (مبايض) عديدة، تكون كل منها ثمرة فقيرة (أكين) وتتحد الأغلفة الثمرية لها عند القاعدة، والتي تكون أجساما صلبة غير منتظمة الشكل، يطلق على كل منها Seed ball، والأصناف المستنبطة حديثا من البنجر ذات بذرة واحدة Monogerm تشبه الفقيرة (الأكين).

تركيب البذرة

تتكون البذرة الناضجة من أربع مكونات هامة وتعتبر ضرورية لبقاء البذرة حية، وهذه المكونات هي: ١- الجنين، ٢- المواد الغذائية المخزنة، والتي يتغذى عليها النبات الجديد عند الانبات، إلى أن يعتمد على نفسه في تكوين غذائه، ٣- غلاف البذرة وهو القصرة، ٤- الانزيمات والهرمونات اللازمة لتحليل الغذاء المخزن وتكوين أنسجة جديدة في البادرة أثناء الانبات.

وتختلف أجنة بذور النباتات المختلفة أثناء تكوينها على النبات الأم في سرعة نموها وامتصاص الغذاء بالاندوسبرم، ففي بعض النباتات مثل الخروع والقمح والذرة وغيرها، ينمو الجنين ببطئ، ولذلك فلا يستنفذ كل المواد الغذائية قبل نضج البذرة، وبذلك فيوجد في البذرة الناضجة مقدار كبير من الاندوسبرم، وتسمى مثل هذه البذور بالبذور الاندوسبرمية Endospermic، وعلى العكس من ذلك في نباتات أخرى مثل الفول (نباتات ذات فلقتين)، فإن الجنين ينمو بسرعة، ويمتص أثناء تكشفه كل المواد الغذائية من الاندوسبرم والنيوسيلة ويحتفظ بها حتى نضج البذرة، وتخزن هذه المواد الغذائية في جسم الجنين أو

الفلقتين، وتسمى مثل هذه البذور بالبذور اللاندوسبرمية أو عديمة الاندوسبرم Exendospermic، وفي معظم الحالات تمتص النيوسيلة، وتتحلل أثناء نمو الجنين. وأحيانا يتبقى بالبذرة الناضجة بقايا نسيج النيوسيلة ويعرف بالبريسبرم، وتسمىالبذرة بريسبرمية كما في بذرة البنجر.

أماكن تخزين المواد الغذائية بالبذور

تختلف الأنواع النباتية من حيث المكان الأساسي الذي تخزن فيها المواد الغذائية والعناصر المعدنية بالبذور.

وتقسم البذور بالنسبة لمكان تخزين المواد الغذائية بها إلى ثلاثة أنواع هي: **١- الاندوسبرم** ، كما هو الحال في بذور النجيليات والخروع وغيرها، **٢- الجنين**، كما هو الحال في النباتات البقولية، **٣- البريسبرم**، كما هو الحال في البنجر والبن

ويمكن لأي جزء من الأجزاء السابقة أن يكون مكانا أساسيا لتخزين المواد الغذائية بالبذور، وعلى سبيل المثال، تخزن المواد الكربوهيدراتية والبروتينية أساسا في الاندوسبرم والدهون في الجنين.

إن طبقة الأليرون، وهي الطبقة الخارجية من الاندوسبرم، تتكون من خلايا حية كبيرة الحجم نسبيا سميكة الجدر، تحتوي على نسبة عالية من البروتين. ولقد وجد أن الأهمية الكيماوية والفسيولوجية لخلايا الأليرون تفوق أهميتها كمكان لتخزين المواد الغذائية بالبذرة.

الانبات Germination

يعرف علماء فسيولوجيا المحاصيل الانبات بأنه عبارة عن تكشف البادرة فوق سطح التربة، على أن تكون طبيعية، وقادرة على النمو وتكوين نباتا طبيعيا. أما علماء النبات، فيعرفون الانبات بأنه عبارة عن بروز (تكشف) الجذير من غلاف البذرة.

وتعتبر البذرة مكتفية ذاتيا بالنسبة لكمية الغذاء والطاقة اللازمة لانباتها، ولكن يحتاج هذا الغذاء المخزن إلى تحلل لكي ينتقل من مكان إلى آخر بالبذرة ويستفاد منه في النمو.

وتمر البذور أثناء انباتها بسلسلة من العمليات المتتالية هي: تشرب وامتصاص البذور للماء، تميوء أنسجة البذرة، امتصاص الأكسجين، نشاط الانزيمات وتحلل المواد الغذائية المخزنة المعقدة، انتقال المواد البسيطة الناتجة من التحلل إلى محور الجنين، زيادة معدل التنفس والتمثيل، استبداء انقسام الخلايا وزيادتها في الحجم.

أ- تشرب وامتصاص البذور للماء

عندما توضع البذور في بيئة مبللة بالماء، فإنها تمتص الماء عن طريق التشرب Imbibition وذلك عن طريق المواد الغروية الموجودة بها. وتتوقف كمية الماء التي تتشربها البذرة على تركيبها الكيميائي. وأن البروتينات والبكتينات غرويات محبة للماء، وتمتص الماء بكمية أكبر من النشا، ولذلك فإن حبوب النجيليات مثل الذرة الشامية تمتص الماء بمقدارثلث وزن الحبة، بينما تمتص بذور فول الصويا الماء بمقدار نصف وزنها تقريبا٠

وان عملية تشرب الماء بواسطة البذور تعتبر عملية طبيعية للانتشار خلال قصرة البذرة ٠ وان عملية انتفاخ المواد الغروية ينتج عنها ضغوطا عالية جدا قد تصل الى مئات ضغط جوى ، ويؤدى هذا الضغط إلى تمزق غلاف البذرة ، كما ينتج عنه لحد ما فراغا يساعد على نمو البادرة في التربة، وأن تمزق غلاف البذرة يساعد على خروج الجذير والريشة من البذرة.

ومن الجدير بالذكر، أن انتفاخ البذرة لا يعني بالضرورة أن البذرة حية، إذ أن عملية الانتفاخ هذه ترجع أساسا إلى نشاط طبيعي بالبذرة، وأن البذرة التي لا تحتوي على جنين، يمكنها أن تتشرب الماء، وتنتفخ ويمتزق غلافها.

ب- التميوء والنشاط الانزيمي

بمجرد زيادة تميوء (ترطيب) البذور، فإن المواد الغذائية المعقدة والأنسجة الموجودة بالبذرة تنشط من جديد. وأن استمرار هذا النشاط يحتاج إلى طاقة. وتحصل البذرة أثناء إنباتها على الطاقة اللازمة لها من هدم المواد الغذائية المعقدة على خطوات متتابعة في عملية التنفس، ويم هذا الهدم (التنفس) في ظروف هوائية أو لا هوائية، وتعتمد عمليات الهدم أساسا على الإنزيمات. وينتج عن التنفس تخليق مركبات بها روابط الفوسفات الغنية بالطاقة.

وعند بداية انبات البذور، تبدأ الهرمونات النباتية في النشاط وتساعد في عمليات الانبات الأساسية، وتوجد عدة أنشطة لهرمونات النمو كما يلي:

١- تقوم الجبريلينات Gibberellins بتنشيط انزيمات التحلل.

٢- تقوم السيتوكينينات Cytokinins بتنشيط انقسام الخلايا، مما يؤدي إلى تكشف الجذير والريشة. وأن استبداء استطالة غمد الجذير (تكشف قمة الجذر) يكون أساسا عن طريق زيادة الخلايا في الحجم.

٣- تقوم الأكسينات Auxins بتشجيع النمو عن طريق استطالة غمد الجذير، والجذير والريشة، وعن طريق توجيه الريشة والجذير في الوضع الصحيح بالنسبة لفعل الجاذبية الأرضية، أي الريشة إلى أعلى والجذير إلى أسفل، وذلك بغض النظر عن وضع البذرة عند الزراعة.

جـ- انقسام واستطالة الخلايا وبروز الجنين من البذرة

بعد انتفاخ البذور عن طريق تشرب الماء وزيادة سرعة معدل التنفس ونشاط الانزيمات وغير ذلك، ينشق غلاف البذرة ويبدأ نمو الجنين وذلك عن طريق استطالة الخلايا التي تكونت، وعن طريق تكوين خلايا جديدة في منطقة النمو في كل من الجذير والريشة.

د- تكوين الهيكل الأولي للنبات

عند بداية الإنبات ينمو الجذير بمعدل أسرع من نمو الريشة ولذلك فإنه يكون أول أجزاء الجنين التي تتكشف من غلاف البذرة، وبمجرد خروج الجذير من قصرة البذرة، يبدأ في التفرع. وبعد بضعة أيام من بداية الإنبات، يصبح الوزن الجاف للمجموع الخضري Shoot أعلى من مثيله للمجموع الجذري. ومن الجدير بالذكر، أنه يطلق على المجموع الخضري في هذه

المرحلة بالمجموع الخضري الجنيني Embryonic schoot والذي يتكون من الريشة، وغمد الريشة والفلقة أو الفلقتين وذلك حسب النوع النباتي.

وأن الوزن الكلي للبذور يأخذ في النقصان وذلك لمدة عشرة أيام من بداية الانبات، ويرجع ذلك إلى الفقد الذي يحدث في المواد المخزنة التي تحدث في البذور عن طريق التنفس.

ومن الجدير بالذكر، أن تكشف (انبثاق) الجذير من غلاف البذرة أولا وكذلك نموه بسرعة أكبر من المجموع الخضري في بداية الإنبات له أهمية في تثبيت البادرة وامتصاص الماء والعناصر الغذائية الأولية.

وفي بذور النباتات ذات الفلقة الواحدة التابعة للعائلة النجيلية، يخرج الجذير محاطا بغمد الجذير Coleorhiza وبمجرد خروجه من غلاف الحبة، يبدأ التفرع، وهذا يعمل على زيادة السطح المعرض للامتصاص والتلامس مع التربة (شكل ٨-٢)، وتخرج الريشة (مغلفة بغمد الريشة) بعد الجذير.

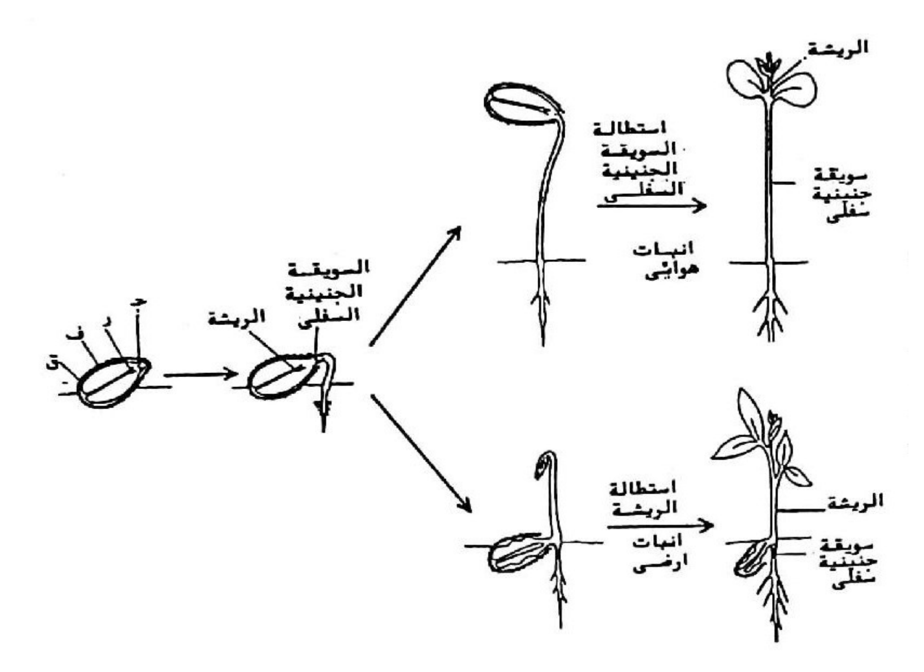
ويوجد نوعين من انبات البذور ليس لهما علاقة بتركيب البذرة هما:

أ- **إنبات هوائي Epigeal germination**، وفيه تنمو السويقة الجنينية السفلى (التحت فلقية) Hypocotyl فيما بين الفلقتين والجذير حاملة معها الفلقتين، وبينهما الريشة، فوق سطح التربة (شكل ٨-٢). وبمجرد تعرض الفلقتين لضوء الشمس، يتحول لونها إلى اللون الأخضر ويبدآن في تمثيل الغذاء ضوئيا، وبمجرد تكوين أول ورقة خضرية على النبات تجف الفلقتين.

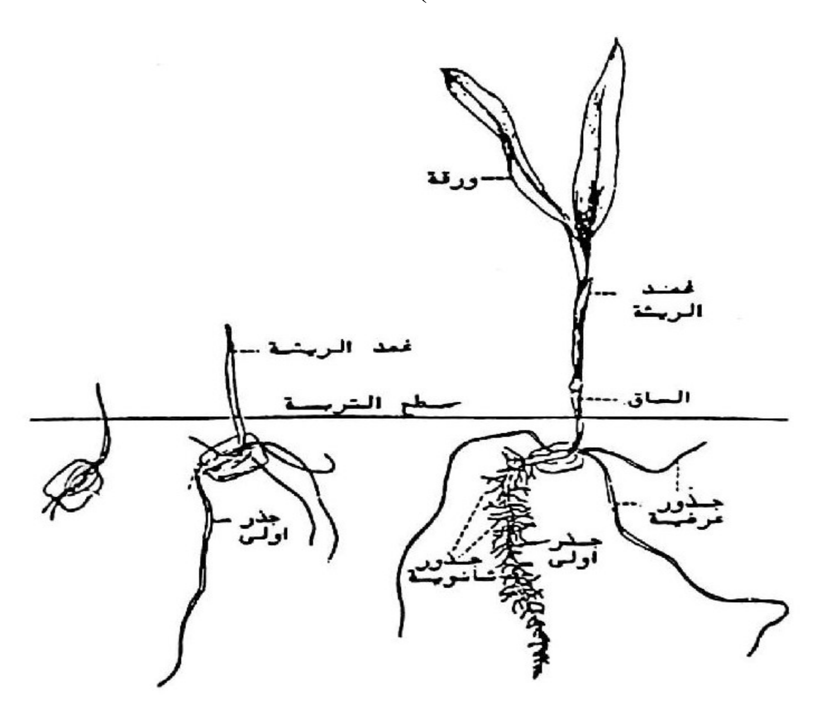
ومن أمثلة محاصيل الحقل التي تنبت بذورها إنباتا هوائيا هي الترمس، والبرسيم الحجازي من نباتات ذات الفلقتين، والبصل من نباتات ذات الفلقة الواحدة.

ب-**إنبات أرضي Hypogeal germination** وفيه لا تستطيل السويقة الجنينية السفلى ولذلك فتظل الفلقات أسفل سطح التربة، بينما تستطيل السويقة الجنينية العليا (الفوق فلقية أو السلامية الكائنة بين الفلقتين والعقدة الأولى)، وتدفع الريشة فوق سطح التربة (شكل ٨-٢، ٣). والمثال على ذلك بذور محصول الفول البلدي، ومحاصيل الحبوب المختلفة.

ومن الجدير بالذكر، ان إنبات بذور الفول السوداني في الحقل، إما أن يكون هوائي، أو أرضي، متوقفا ذلك على عمق زراعة البذرة، وهذا يرجع إلى أن السويقة الجنينية السفلى يمكنها أن تصل إلى طول معين فقط.



شكل (٨-٢). إنبات هوائي، وإنبات أرضي في البذور المختلفة، (ق= القصرة، ف= الفلقات، ر= الريشة، جـ= الجذير).



شكل (٨-٣). إنبات حبة ذرة شامية، (إنبات أرضي).

العوامل التي تؤثر على إنبات البذور تحت ظروف الحقل

تتعدد العوامل التي تؤثر على إنبات بذور المحاصيل تحت ظروف الحقل. ولكي يتم إنبات البذور لا بد من توافر مجموعتين من العوامل الضرورية هما: عوامل بيئية وعوامل خاصة بالبذور نفسها

ويمكن تقسيم العوامل البيئية التي تؤثر على إنبات البذور في الحقل إلى:

أ) عوامل بيئية ضرورية، والتي بدونها لا يتم الإنبات وهي: الماء، والحرارة، والغازات، بالإضافة إلى الضوء في بعض المحاصيل. وعوامل تؤثر على إنبات البذور فقط ولكنها غير ضرورية له، وأهمها: حموضة التربة، عمق الزراعة، تجهيز مرقد البذرة، الدورة الزراعية وغيرها.

أولا- العوامل البيئية الضرورية للإنبات

أ- الماء

يعتبر الماء مهما لترطيب البذور كخطوة أولية في إنباتها كما سبق أن ذكرنا. وبوجه عام، تحتوي البذور الجافة على ٨-١٤% ماء، متوقفا ذلك على ظروف التخزين وعلى الظروف البيئية التي تم نضج البذور فيها وأن هذه الكمية من الرطوبة لا تكفي الإنبات، ولذلك فتمتص البذور الماء بنسبة تتراوح بين ٣٠-٤٠% من وزنها حتى يتم الإنبات. ويمتص الجنين كمية من الماء أكبر من الإندوسبرم.

وتحت تماثل ظروف الإنبات، فإن قدرة البذور على امتصاص الماء، تعتمد على البذور نفسها، وذلك من حيث تركيبها الكيميائي، وتركيب غلافها وغيرها، كما تعتمد على الظروف البيئية التي تنبت فيها البذور مثل درجة الحرارة والجهد المائي للتربة وغيرها. وعلى سبيل المثال، البذور ذات الإندوسبرم الدهني مثل الفول السوداني، تمتص الماء بمعدل أقل بكثير عن مثيلتها التي يكون النشا هو المكون الأساسي للإندوسبرم مثل حبوب القمح، كما أن معدل امتصاص البذور للماء يزداد بارتفاع درجة الحرارة.

ب- درجة الحرارة

كما هو الحال في كل العمليات الحيوية الأخرى، يحتاج الإنبات إلى الحرارة، وأن كمية الحرارة اللازمة للإنبات تختلف باختلاف أنواع المحاصيل، كما قد تختلف باختلاف أصناف المحصول الواحد، ولهذا السبب فإنه يوجد لكل محصول ميعاد زراعة محدد لسد إحتياجاته الحرارية.

وأن لكل محصول ثلاث درجات حرارة رئيسية هي: درجة الحرارة الدنيا ودرجة الحرارة المثلى ودرجة الحرارة القصوى (جدول ٨-١).

درجة الحرارة الدنيا Minimum temperature هي درجة الحرارة الأقل من الدرجة التي عندها تنبت ٥٠% فقط من البذور وتكون جذور وأوراق طبيعية. وعموما، تكون درجة الحرارة الدنيا اللازمة لإنبات بذور الأنواع النباتية، التي تنمو في المناطق المعتدلة، أقل من تلك اللازمة لإنبات بذور النباتات، التي تنمو في المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية (جدول ٨-١).

جدول (٨-١). درجات الحرارة الرئيسية لإنبات بذور بعض محاصيل الحقل الهامة

المحصول	درجات الحرارة الرئيسية (مْ)		
	الدنيا	المثلى	العظمى
الأرز	١٠-١٢	٣٠-٣٢	٣٦-٣٨
الذرة الشامية	٨-١٠	٣٢-٣٥	٤٠-٤٤
الذرة الرفيعة	٧-٨	٣٥	٤٠-٤٤
القمح	٣-٥	٢٥	٣٠-٣٢
الشعير	٣-٥	١٩-٢٧	٣٠-٣٢
الراي	٣-٥	٢٥-٣٩	٣٠-٤٠
الكتان	٢-٣	٢٥	٣٠
القطن	١٢	٣٢	٤٠
زهرة الشمس	٨-٩	٢٨	٣٥
الخروع	٤-١٥	٣١	٣٥-٣٦
البصل	صفر	٢٥	٣٥
بنجر السكر	٤-٥	٢٥	٣٠
البرسيم الحجازي	١	٣٠	٣٧

وإن درجة الحرارة المثلى Optimum temperature هي درجة الحرارة التي يحدث عندها أعلى نسبة إنبات للبذور، ونظرا إلى أن درجة الحرارة المثلى مرتبطة إرتباطا وثيقا بطول فترة الإنبات، فإن البعض يعرف درجة الحرارة المثلى بأنها درجة الحرارة التي ينبت عندها أعلى نسبة من البذور في أقصر وقت.

وإن درجة الحرارة القصوى Maximum temperature هي درجة الحرارة الأعلى من الدرجة التي تنبت عندها ٥٠% من البذور فقط.

ومن الجدير بالذكر أن هناك بعض العمليات الزراعية التي قد تساعد على التغلب على التأثير الضار لدرجات الحرارة المرتفعة على الإنبات وأهمها:

١- تكرار الري

يؤدي تكرار الري عادة إلى خفض درجة حرارة التربة، ويتم إجراء هذه العملية عند إنبات بذور بعض المحاصيل الحساسة لدرجة الحرارة المرتفعة أثناء الإنبات، وذلك عندما تكون درجة حرارة الطبقة العليا من التربة قد تزيد عن ٣٨ْم، وقد وجد أن إعطاء ١-٢ رية خفيفة يوميا قد يعمل على خفض درجة حرارة التربة إلى مستوى يسمح بانبات بذور مثل هذه المحاصيل.

٢- التغطية Mulching

إن تغطية سطح التربة ببعض المواد التي تستخدم لهذا الغرض تؤثر على درجة حرارة التربة. ومن أمثلة هذه المواد بقايا المحاصيل والورق والبلاستيك، وغيرها. ولقد وجد أن تغطية سطح الأرض بالقش يؤدي إلى خفض درجة حرارة التربة، ويرجع ذلك إلى اعتراض القش إلى الأشعة الضوئية وعدم وصولها إلى الأرض. كما أن تغطية سطح الأرض بالقش تؤدي إلى خفض فقد الماء عن طريق البخر.

ولقد وجد أن تغطية سطح التربة بالقش عملت على خفض درجة الحرارة القصوى في مرقد البذرة، مما أدى إلى زيادة معنوية في نسبة تكشف بادرات القطن وفول الصويا، (Prihar و Mehta عام ١٩٧٢). كما وجد أن إستخدام البلاستيك الشفاف في التغطية، يؤدي إلى إرتفاع درجة حرارة التربة، وعلى العكس من ذلك يؤدي تغطية سطح التربة بواسطة بلاستيك أسود اللون إلى خفض درجة حرارة التربة، بالمقارنة بالتربة التي لم تغطى، (Adams عام ١٩٦٢).

٣- زراعة أصناف مقاومة لدرجات الحرارة الغير مناسبة

تختلف أصناف المحاصيل المختلفة في درجة استجابتها للإنبات في درجات الحرارة المرتفعة الغير مناسبة للإنبات. وعلى سبيل المثال، وجد أن أصناف القمح القصيرة الساق، أكثر مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة أثناء الإنبات وطور البادرات، بالمقارنة بالأصناف طويلة الساق.

٤- معاملة البذور قبل الزراعة

تعتبر معاملة البذور قبل الزراعة وسيلة من وسائل التغلب على درجات الحرارة الغير مناسبة أثناء الإنبات، إذ وجد أن تعريض بذور بعض

المحاصيل قبل زراعتها لدرجات حرارة منخفضة (٣ْم) لمدة ٢١ – ٢٨ يوما أدت إلى إنبات البذور في درجات حرارة حتى ٣٠ْم.

جـ- الضوء

عموما- لا تحتاج معظم بذور محاصيل الحقل إلى الضوء لإنباتها. بينما تحتاج بذور بعض المحاصيل إلى الضوء ولو لفترة قصيرة حتى تنبت مثل بذور الخس والدخان، وتنبت بذور بعض المحاصيل بسرعة أكبر في وجود الضوء مثل القمح والشعير.

د- الغازات في بيئة الإنبات

تنبت كل البذور تقريبا في جو يحتوي على ٢٠% أكسجين و٠.٠٣% ثاني أكسيد الكربون تقريبا. ولقد وجد أن كمية الأكسجين اللازمة لإنبات البذور تختلف باختلاف المحاصيل المختلفة، كما سبق أن ذكرنا. كما أن بذور معظم المحاصيل تنبت تحت تركيز منخفض من الأكسجين عن إحتياج النباتات له في أطوار نموها الأخرى.

وهناك بذور بعض النباتات وخصوصا بذور الحشائش، تزداد نسبة إنباتها بدرجة واضحة بزيادة تركيز الأكسجين، وكلما انخفض تركيزه ينخفض التنفس تدريجيا وفي النهاية يتوقف الإنبات. ولذلك فلا تنبت بذور الحشائش الموجودة أسفل سطح الأرض، بينما تنبت عندما تحرث الأرض، أو تعزق، فتصبح البذور على سطح التربة ويتوافر الأكسجين اللازم لإنباتها، وهذا قد يفسر عدم إنبات بذور الحشائش الموجودة في الأرض دفعة واحدة، مما يؤدي إلى عدم إمكانية مقاومتها مرة واحدة أو خلال موسم واحد.

ثانيا- العوامل البيئية التي تؤثر فقط على الإنبات

أ- عمق الزراعة

يعتبر عمق الزراعة من العوامل الهامة التي تؤثر على نسبة تكشف البادرات في الحقل. وذلك لأنه عندما تزرع البذور سطحيا فقد لا يحدث إنبات أو لا تتكشف البادرات فوق سطح التربة، وذلك بسبب سرعة بخر الماء من الطبقة السطحية للتربة، مما يسبب جفافها، وبالتالي عدم قدرة البذور على الإنبات.

كما أنه عندما تزرع البذور عميقا في التربة، فقد لا تنبت أيضا، وذلك بسبب نقص التهوية، أو قد تنبت ولكن قد تموت قبل أن تصل إلى سطح التربة،

بسبب إستنفادها الغذاء المخزون بالبذرة، وذلك قبل تكشف المجموع الخضري فوق سطح التربة.

ب- تركيز الأملاح في الأرض ودرجة الحموضة

يؤدي زيادة تركيز الأملاح في الأرض إلى نقص سرعة ونسبة إنبات بذور محاصيل الحقل المختلفة. ويرجع نقص نسبة وسرعة إنبات البذور في الأراضي الملحية إلى الآتي:

١- إرتفاع الضغط الإسموزي للمحلول الأرضي، وهذا يؤدي إلى نقص إمتصاص الماء بواسطة البذور من المحلول الأرضي

٢- التاثير النوعي للأملاح Specific effect عن طريق زيادة نسبة إمتصاص أيونات معينة سامة مثل الكلور والبورون والصوديوم عند وجودها بنسبة مرتفعة في محلول التربة.

ولقد وجد أن بذور نباتات المحاصيل المختلفة تختلف في قدرة بذورها على الإنبات في الأراضي الملحية. ولقد وجد المؤلف أن نباتات الذرة الشامية والفول البلدي أكثر تحملا لملوحة التربة في طور الإنبات بالمقارنة بطور النمو الخضري والثمري، والعكس في نباتات بنجر السكر والقطن.

وتؤثر حموضة التربة على إنبات بذور المحاصيل أيضا عن طريق تأثيرها على نفاذية الخلايا وبالتالي على امتصاص البذور للماء.

جـ- الدورة الزراعية

إن المحصول السابق في الدورة الزراعية قد يؤثر على نسبة إنبات بذور المحاصيل اللاحقة له في الدورة الزراعية، وعلى سبيل المثال، يثبط إنبات بذور القطن عندما تزرع بعد برسيم حجازي، إذ أن بذور القطن تكون حساسة لمادة السابونين Sabonin التي تتركها نباتات البرسيم الحجازي في التربة.

د- تجهيز الأرض للزراعة

إن طوبوغرافية الحقل وتجهيزه تلعب دورا هاما في تأثيرها على نسبة إنبات بذور محاصيل الحقل، إذ أن البذور التي تزرع في أماكن مرتفعة في الحقل، فإنها تعاني من جفاف التربة، على عكس التي تزرع في أماكن منخفضة والتي قد تعاني أيضا من كثرة الماء، والتي تعيق تبادل الغازات بين البذور والجو المحيط، ويؤدي ذلك في كلتا الحالتين إلى نقص الإنبات.

ثالثا- العوامل الخاصة بالبذور نفسها

إن أهم العوامل أو الصفات الخاصة بالبذور والتي تؤثر على إنباتها هي حيوية البذور، وسكون البذور، وحجم البذور.

أ- حيوية البذور Seed viability

تعرف حيوية البذور بأنها عبارة عن قدرة البذور على الإحتفاظ بحيويتها والإنبات وتكوين بادرة طبيعية. وكلما كانت البذور ذات حيوية عالية، كلما زادت سرعة إنباتها في الحقل، وكلما كان الإنبات متجانسا وتكشف البادرات قويا.

ب- طول عمر البذرة Longevity

يبدأ عمر البذرة إبتداءا من لحظة وصول البذرة إلى نضجها الفسيولوجي على النبات وعند هذه المرحلة تكون البذرة قد وصلت إلى أقصى حيويتها، ثم تبدأ حيويتها بعد ذلك تقل بسرعة في بعض الأنواع النباتية، ويبطئ في أنواع أخرى.

وتختلف بذور المحاصيل المختلفة في طول الفترة التي تظل فيها محتفظة بحيويتها، فهناك بعض الأنواع النباتية التي تفقد بذورها حيويتها خلال بضعة أيام من وصولها إلى النضج الفسيولوجي، على عكس بذور بعض النباتات البقولية التي يمكن أن تحتفظ بقدرتها على الإنبات إلى فترة قد تصل إلى سنوات عديدة.

جـ- سكون البذور Seed dormancy

يعرف سكون البذور بأنه عدم إنباتها حتى لو وضعت في ظروف مثلى لإنباتها. ويوجد كثير من محاصيل الحقل التي تتعرض بذورها إلى السكون مثل الفول السوداني والأرز والخس والشعير وغيرها، بالإضافة إلى نباتات العلف والمراعي وخصوصا تلك التابعة للعائلة النجيلية والبقولية.

ومن الجدير بالذكر أن سكون البذور ليس صفة مرغوبة في محاصيل الحقل، حيث أنها تتعارض مع العمليات الزراعية المنتظمة، إذ أنها تؤدي إلى عدم إنتظام الإنبات في الحقل. وعلى الرغم من ذلك فإن درجة معينة من السكون تكون مفيدة في منع الإنبات في الحقل عندما تكون البذور على النبات الأم، كما يحدث في بعض محاصيل الحبوب، وبالتالي فإن أحد أهداف مربي النباتات في المناطق المعتدلة هو إنتاج أصناف من محاصيل الحبوب تكون بذورها ذات فترة سكون. وأن سكون الحبوب في الأرز يعتبر مفيدا في المناطق الإستوائية حيث تسقط الأمطار عادة أثناء فترة الحصاد.

أنواع السكون

يقسم سكون البذور على حسب مسبباته إلى الآتي:

١- سكون ناتج عن عدم نفاذية غطاء البذور للماء

يرجع السكون في أنواع نباتية كثيرة إلى عدم نفاذية غطاء البذرة للماء. وهذه الظاهرة موجودة في بذور نباتات العائلة البقولية والخبازية والعليقية وغيرها.

٢- سكون ناتج عن نقص تبادل الغازات خلال غلاف البذرة

إن نقص تبادل الغازات خلال غطاء البذرة وخصوصا الأكسجين يؤدي إلى سكون البذور، ومن الأمثلة على ذلك بذور نباتات بعض محاصيل الحبوب.

٣- سكون ناتج عن وجود مثبطات الإنبات في غطاء البذرة

يؤدي وجود مثبطات الأنبات في غطاء البذرة إلى دفعها إلى السكون. والمثال على ذلك، وجود مواد مثبطة للإنبات في ثمار بنجر السكر.

٤- سكون ناتج عن سكون الجنين

قد تكون الأجنة مكتملة النمو من ناحية التركيب الظاهري إلى أنها غير قادرة على الإنبات، وتسمى هذه الظاهرة بطور الراحة Rest period.

وقد يكتمل نمو البذرة وما يزال الجنين لم يكتمل نموه بعد، وتسمى هذه الأجنة بالأجنة الأثرية، وتلاحظ هذه الظاهرة في حبوب الذرة الشامية وفي نباتات العائلة الخيمية.

ومن الجدير بالذكر، أن وجود أو عدم وجود السكون في بذور أي صنف تحدده العوامل الوراثية، كما أن العوامل البيئية التي تنضج فيها البذور تحدد أيضا درجة السكون، وهذا يوضح السبب في وجود تباين في درجة سكون بذور نفس النوع أو الصنف النامي في ظروف بيئية مختلفة أو في مواسم زراعية مختلفة.

كسر طور السكون

تختلف طرق كسر سكون البذور المختلفة متوقفا ذلك على نوع السكون وأهم هذه الطرق كما يلي:

١- كسر أغطية البذور

يتم كسر أغطية البذور الصلدة ميكانيكيا عن طريق وضعها في اسطوانات مبطنة من الداخل بمادة الكاربوراندم ثم تقلب.

كما يمكن كسر أغطية البذور كيماويا عن طريق معاملة البذور بحامض كبريتيك مركز (٧٥%).

ومن الجدير بالذكر أنه عند زراعة البذور الصلدة في التربة، تقوم بعض الميكروبات والفطريات بتحليل الأغلفة.

٢- تعريض البذور لدرجات الحرارة المنخفضة

يمكن كسر سكون البذور عن طريق إجراء الإنبات على مرقد بذرة مبلل تحت درجات الحرارة المنخفضة، ويطلق على هذه العملية "التنضيد Stratification) وهذه العملية شائعة في محاصيل البساتين. ولقد وجد أن الحبوب المحصودة حديثا في بعض محاصيل الحبوب لا تنبت تحت درجات الحرارة المثلى لإنباتها، ولكنها تنبت في درجات حرارة منخفضة عن ذلك.

٣- تعريض البذور إلى الضوء

من المعروف أن الضوء يؤثر على قدرة إنبات بذور بعض الأنواع النباتية، ومن الأنواع النباتية المنزرعة التي تحتاج إلى الضوء لكسر السكون والانبات هي الخس والدخان وبعض أنواع محاصيل العلف والمراعي النجيلية، وغيرها.

٤- التخزين في درجات حرارة مرتفعة

يمكن كسر طور السكون في بذور كثيرة من الأنواع النباتية عن طريق رفع درجة حرارة تخزين البذور (٤٠ْم) لمدة ٣-٧ أيام، مع إمرار تيار من الهواء وذلك قبل زراعة البذور، كما هو الحال في محصول الفول السوداني.

٥- إزالة مثبطات الإنبات الذائبة في الماء والموجودة في البذور أو في الثمار

لقد وجد أن تنشيط إنبات بذور البنجر يتم عن طريق غسل الثمار لمدة ١-٢ ساعة في ماء جاري وذلك لإزالة المواد المثبطة.

٦- معاملة البذور بالمواد الكيميائية

يمكن كسر السكون في بذور بعض المحاصيل مثل الفول السوداني عن طريق نقعها في محلول من حمض الجبريليك.

ولقد وجد أن الكينيتين Kinetin فعالا في كسر السكون في بذور أنواع نباتية مختلفة. ويعتبر الإيثيلين Ethylene من ضمن المواد الفعالة في كسر سكون البذور، إذ وجد أنه يشجع إنبات بذور الخس والحمص المنقوعة في الماء.

جـ- حجم ووزن البذور Seed size and aensity

لقد وجد في كثير من محاصيل الحقل، أن معدل تكشف البادرات واالوزن الغض والجاف للبادرات أثناء الشهر الأول من الزراعة كانت مرتبطة إرتباطا موجبا بوزن وحجم البذور. وعلى سبيل المثال، وجد أن البذور الأثقل وزنا من برومجراس Bromegrass أعطت أقوى البادرات.

ولقد وجد أنه عندما زرعت بذور كبيرة الحجم وأخرى صغيرة الحجم من الفول بأعداد متساوية في كل خط في الحقل، تفوقت النباتات الناتجة من البذور كبيرة الحجم في المحصول (Clark and Peck 1968) وعندما زرع نفس الوزن من البذور بكل خط، كان محصول النباتات الناتجة من البذور الصغيرة أعلى من محصول النباتات الناتجة من البذور الكبيرة الحجم ويرجع ذلك إلى زيادة عدد النباتات في حالة البذور صغيرة الحجم.

وفي نباتات فول الصويا، وجد أن هناك إرتباطا موجبا بين كمية المحصول والبذور الكبيرة الحجم، إذ وجد أن البذور الكبيرة الحجم أعطت محصولا أعلى من المحصول الناتج من نفس العدد من البذور صغيرة الحجم، بينما لم تتأثر الصفات الأخرى للنبات (Smith and Camper, 1975) بينما وجد بوريس Burriss وآخرون، ١٩٧٣، أن حجم بذور فول الصويا كان مرتبطا إرتباطا موجبا بسرعة تكشف البادرات فوق سطح التربة، ومساحة السطح الورقي للنباتات، وارتفاع النباتات وكمية المحصول.

أما في محصول الذرة الرفيعة الحبوب، فقد وجد أن هناك إرتباطا موجبا بين حجم الحبوب ونسبة الإنبات وحجم البادرات، وعدد النباتات في وحدة المساحة، بينما لم يؤثر حجم الحبوب معنويا على كمية محصول الحبوب.

الباب التاسع

العلاقات المائية

Water Relation

أهمية الماء في حياة النبات

١- يدخل الماء في كثير من تفاعلات التمثيل الغذائي، مثل عملية التمثيل الضوئي، إذ يعتبر الماء هو المصدر الوحيد لذرات الهيدروجين، التي تلزم لاختزال غاز ثاني أكسيد الكربون.

٢- يعتبر الماء مكونا رئيسيا للبروتوبلازم.

٣- يعتبر الماء وسطا لانتقال المواد الغذائية من المحلول الأرضي إلى داخل النبات، كما يعتبر أيضا وسطا لانتقال العناصر الغذائية والمواد الممثلة داخل الخلية، ومن خلية إلى أخرى، ومن نسيج لآخر ومن عضو لآخر.

٤- يعتبر الماء هو الوسط الذي يتم فيه العديد من تفاعلات التمثيل الغذائي بالنبات.

٥- يساعد فقد الماء من النبات عن طريق النتح، على خفض درجة حرارة الأنسجة، وتكيفها مع الوسط الذي توجد فيه.

٦- يعتبر الماء ضروريا لحفظ خلايا النبات في حالة انتفاخ، وهذا يؤدي بدوره إلى بقاء الخلايا الحارسة بالأوراق مفتوحة، مما يسمح بانتشار غاز ثاني أكسيد الكربون خلال أنسجة النبات. كما يساعد تميؤ الخلايا على الإبقاء على شكل وبعض صفات النبات.

وتحت ظروف الحقل، تنمو الجذور في تربة مبللة بالماء، بينما تنمو السيقان والأوراق في جو جاف نسبيا، وهذا يسبب استمرار تدفق الماء من التربة خلال النبات إلى الجو.

الجهد المائي Water potential

الجهد المائي عبارة عن الفرق بين الجهد الكيماوي بين محلول مذيبه الماء وبين الماء النقي، حيث ينتقل الماء من محلول ذو جهد مائي مرتفع إلى محلول ذو جهد مائي منخفض. والجهد المائي لا يكون ذو قيمة موجبة وأن أعلى قيمة له تساوي صفر، وهي عبارة عن جهد الماء النقي، وعندما يصبح الماء غير نقي وفيه ذائبات كلما زادت سالبية الجهد المائي (أي قل الجهد المائي) حيث أن جزيئات المذاب سوف تجذب جزيئات الماء وتحد من حركتها.

وأن حركة الماء في التربة والنبات، تكون على أساس الفرق في الجهد (الطاقة)، وحيث أن الماء في النبات وفي التربة، لا يكون عادة نقي بسبب المواد المذابة فيه، فإن جهده يكون أقل من مثيله للماء النقي، وأن جهد الماء الموجود في التربة والنبات يسمى بـ"الجهد المائي" ويرمز له بالحرف اليوناني (بساي ψ_w) ويعبر عنه كقوة لكل وحدة مساحة، وأن وحدة القياس هي بار Bar، (١ بار = ١٠^{٦} داين/ سم^{٢} = ٠.٩٩ ضغط جوي أو ١٠^{٢} جول (J) / كجم). وحيث أن الماء النقي ذو جهد مائي يساوي صفر بار، فإن جهد الماء في النبات وفي التربة يساوي عادة أقل من صفر بار، أي أنه ذو قيمة سالبة، وكلما زادت القيمة السالبة كلما قل الجهد المائي.

إن الجهد المائي للنبات والتربة، عبارة عن حاصل جمع مجموعة من القوى، ويعبر عنها كالآتي:

الجهد المائي = الجهد المهادي + الجهد الأسموزي + جهد الضغط + جهد الجازبية

ψ_w ψ_m ψ_s ψ_p ψ_i

حيث أن:

الجهد المهادي Matric potential: عبارة عن القوى التي يمسك بها الماء، بواسطة مكونات النبات مثل السيليلوز والبروتينات أو التربة، وذلك بواسطة قوى الادمصاص، والخاصية الشعرية (الماء الشعري)، ويمكن فقط أن يزال هذا الماء بواسطة قوة، ولهذا فإن الجهد المهادي ذو قوة سالبة.

الجهد الأسموزي Osmotic potential أو جهد المحلول Solute potential: عبارة عن جهد الماء الناشئ عن وجود ذائبات به. وأن وجود هذه الذائبات في الماء، تخفض من جهد الماء، أو الطاقة الانتقالية الذاتية للماء Kinetic energy، وبالتالي فيصبح المحلول ذو جهد مائي منخفض. ويتأثر الجهد الأسموزي، بتركيز ونوع الذائبات في المحلول، وأن الطاقة الحرة للمحلول تنخفض بزيادة محتواه من الذائبات.

جهد الضغط Pressure potential أو Turgor pressure هو أحد مكونات جهد الماء ويتسبب عن الضغط الهيدروستاتيكي الذي يقع على الماء في الخلية. وفي خلايا النبات الممتلئة يكون ذو قيمة موجبة، لأن دخول الماء إلى الخلية يؤدي إلى دفع البروتوبلاست نحو جدار الخلية. وحيث أن جهد الضغط عبارة عن قوة، فإنه يكون عادة ذو قيمة موجبة، ويعتبر ذو أهمية قليلة في التربة، ولكنه ذو أهمية رئيسية في خلايا النبات.

جهد الجاذبية Gravitarional potential يكون جهد الجاذبية موجود دائما، وهو عبارة عن طاقة الجازبية لكل وحدة كتلة وهي هامة في محلول التربة. ولكنه غير هام في النباتات، بالمقارنة بالقوى الثلاث السابقة.

صور الماء الأرضي

عند إضافة الماء إلى الأرض، فإنه يحل محل الهواء ويصبح سطح التربة مبتلا (مشبعا)، أي أن مسام الأرض تمتلئ كلها بالماء، وينتج عن استمرار إضافة الماء، اضطراد حركته إلى أسفل، وحلوله محل الهواء، وعند هذه النقطة تصبح جميع المسام في الجزء العلوي من التربة ممتلئة بالماء، ويطلق على الأرض حينئذ أنها مشبعة بالماء. وإذا توقف إضافة الماء إلى سطح التربة، وتتبعنا التغيرات التي تحدث للماء بالأرض، فإنه يلاحظ أن الماء بالأرض يوجد في صور مختلفة أهمها: الماء الحر (ماء الصرف) والماء الشعري، والماء الهيجروسكوبي.

١- **الماء الحر** Free water: هو الجزء من الماء الأرضي الذي يتحرك إلى أسفل، بعد وصول التربة إلى درجة التشبع، ويفقد إلى باطن الأرض، كما يعتبر هذا الماء زيادة عما يحتفظ به عند السعة الحقلية، وتتراوح قوة شد الماء الحر إلى حبيبات الأرض بين -١,٠إلى -٥,٠ بار أو في المتوسط -٣,٠ بار، وهذا الماء الحر غير مرغوب فيه، إذ تقل قدرة النباتات على امتصاصه، بسبب نقص الأكسجين بهواء الأرض.

٢- **الماء الشعري** Capillary water: بعد يوم أو أكثر من إضافة الماء إلى التربة، تتوقف معظم حركة الماء إلى أسفل (الماء الحر)، حينئذ يقال أن الأرض عند سعتها الحقلية، وإذا اختبرت الأرض عند هذه النقطة، فسيظهر أن الماء قد تحرك من المسام الكبيرة، وحل محله الهواء، أما المسام الدقيقة، فإنها لا تزال ممتلئة بالماء، ويطلق على هذا الماء بالماء الشعري، وهذا الماء الشعري يكون ممسوكا بحبيبات التربة بين السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم. ويتراوح مسك الأرض للماء الشعري بين -١.٠ إلى -٣١بار.

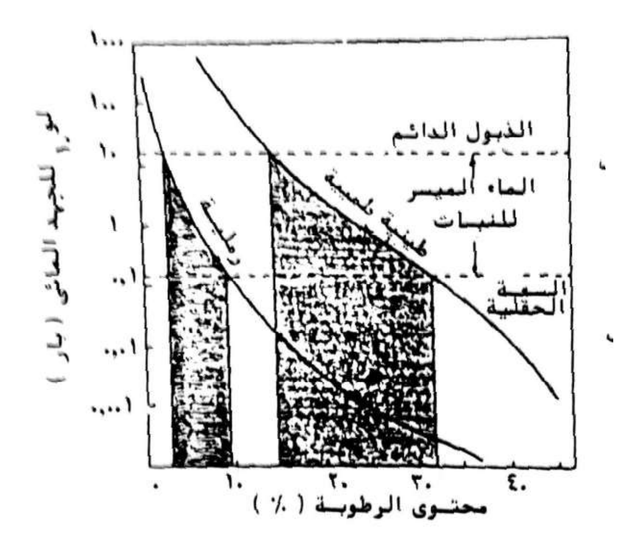
وتمتص النباتات الماء اللازم لها من هذا المصدر. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه ليس كل الماء الشعري ميسرا للنبات، كما أنه يتحرك من المواقع الرطبة بالأرض إلى المواقع التي تحتوي على رطوبة أقل، ولذلك فإنه يتحرك إلى أعلى عند الجفاف، كما يتحرك إلى أسفل، ولكنه يتحرك حركة أفقية محدودة.

٣- **الماء الهيجروسكوبي:** هو الماء الذي يوجد في صورة غلاف حول حبيبات التربة، ويتراوح مقدار مسك حبيبات الأرض لهذا الماء بين -٣١ إلى -١٠٠٠٠ بار، وهذا الماء يكون ممسوكا غالبا بواسطة الغرويات الأرضية، وهذا الماء غير ميسر للنباتات الراقية.

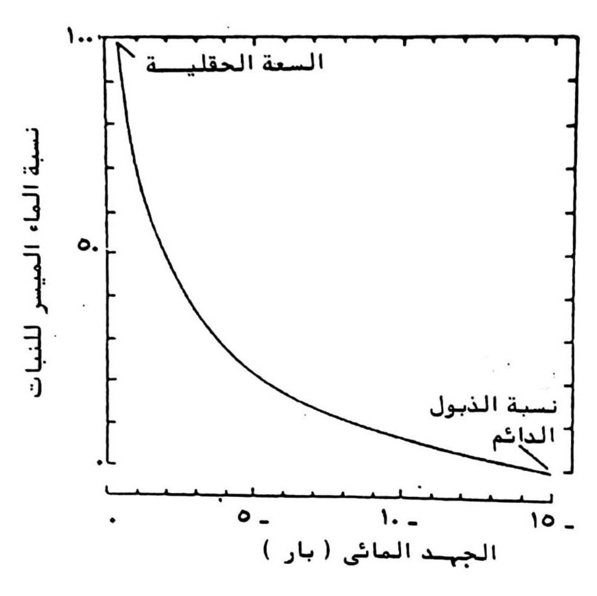
الماء الميسر (المتاح) بالتربة للنباتات

إن جذور النباتات تنمو في التربة المبللة بالماء، وتمتص الماء منها باستمرار، كما أن جزءا من ماء التربة يفقد عن طريق البخر من سطح التربة، وأن هذين النوعين من الفقد، يحدثان في نفس الوقت، كما أنهما مسئولان عن السرعة الواضحة في معدل فقد الماء من الأرض، ويستمر فقد الماء من التربة حتى يصل الجهد المائي للتربة إلى قيمة حرجة، تبدأ النباتات عندها في إظهار آثار نقص الرطوبة الأرضية، وأهمها ذبول النباتات. وأن الماء الذي يمكن أن يستخلص من التربة بواسطة جذور النباتات، يطلق عليه "**الماء الميسر** Available water"، وهو عبارة عن الفرق بين كمية الماء الموجودة في التربة، عند **السعة الحقلية** Field capacity (وهو الماء الذي تحتفظ به التربة ضد الجاذبية الأرضية) وكمية الماء في التربة عند نسبة **الذبول الدائم** (نسبة الماء الأرضي، والتي عندها تذبل النباتات، وتظل في حالة ذبول دائم ليلا ونهارا وتموت إذا لم يضاف إليها الماء). وتعتبر السعة الحقلية الحد الأعلى لمحتوى الرطوبة المخزنة بالتربة والميسرة لنمو النباتات، بينما تعتبر النسبة المئوية للذبول Permanent wilting percentage هي الحد الأدنى للماء القابل للإستفادة بواسطة النباتات.

وأن يسر ماء التربة للنباتات، يتأثر بالصفات الغروية للتربة، مثل مساحة سطح حبيبات التربة، إذ أن التربة الطينية، تحتفظ بحوالي ٢٠% من وزنها ماء ميسر للنباتات، بينما تحتفظ الأراضي الرملية بحوالي ٧% فقط من وزنها ماء ميسر للنباتات، كما هو مبين بشكل (٩-١).



شكل (٩-١). الجهد المائي لأرض رملية، وأخرى طينية طميية عند مستويات رطوبة مختلفة. يتضح أن ٢٠% ماء ميسر للنباتات في الأراضي الطينية الطميية، ٧% فقط في الأراضي الرملية.



شكل (٩-٢). النسبة المئوية للرطوبة الميسرة للنبات في تربة طميية عند جهود مائية مختلفة للتربة. في هذه التربة ٥٠، ٧٥، ٩٠% من الماء الميسر يمسك في هذه التربة عند جهد مائي قدره -٢، -٥، -١٠ بار، على التوالي.

إن الجهد المائي للتربة ψ_{soil} في الأراضي الزراعية، يتأثر أساسا بواسطة الجهد المهادي، ثم بواسطة الجهد الأسموزي. ويمكن ربط الجهد المائي للتربة، بالسعة الحقلية، ونسبة الذبول الدائم، فعند السعة الحقلية، يتراوح الجهد المائي للتربة بين -٠.١ إلى -٠.٣ بار، بينما يتراوح الجهد المائي للتربة عند نسبة (نقطة) الذبول الدائم بين -١٥ إلى -٥٠ بار، ولكن غالبا تكون عند -١٥ بار. إن الجهد المائي عند نقطة الذبول الدائم، ذو أهمية قليلة، إذ أن أكثر من ٧٠% من الماء الميسر، يكون قد استنفد من التربة، عند جهد مائي قدره -٥ بار (شكل ٩-٢)، والذي يبين أن ٥٠، ٧٥، ٩٠% من الماء الميسر تحتفظ به التربة، عند جهد مائي قدره -٢، -٥، -١٠ بار،على التةالي، وأن كمية قليلة من الماء تكون متاحة (ميسرة) في المجال من -١٥ إلى -٣٠ بار (Verasan and Philliips, 1978).

النتح Transpiration والتبخر Evaporation

إن الكمية الكلية من الماء، والتي تفقد من الحقل، عن طريق كلا من النتح من النبات، والتبخير من التربة، يطلق عليها، النتح والتبخر Evapotranspiration وتختصر إلى ET.

والتبخر عبارة عن الماء الذي يتبخر مباشرة من التربة، أو من الماء الذي يتكثف على سطح النبات في صورة ندى، أو نتيجة لسقوط الأمطار أو الري بالرش ثم يتبخر دون الدخول إلى جسم النبات. وعندما يكون منسوب الماء الأرضي مرتفعا وقريبا من سطح الأرض، فإن التبخير يكون كبيرا.

والنتح عبارة عن فقد الماء في صورة بخار إلى الجو من النباتات، وخصوصا من الأوراق. ويفقد النبات عن طريق النتح، حوالي ٩٥% أو أكثر من كمية الماء الكلية التي يمتصها. وهذا يبين أن كمية الماء الفعلية التي يستخدمها النبات في عملياته الحيوية المختلفة، تكون صغيرة جدا، بالمقارنة بالكميات الهائلة التي يفقدها النبات عن طريق النتح. وعلى سبيل المثال، وجد أن نبات واحد من الذرة الشامية يفقد حوالي ٢٥٠ لتر أو أكثر من الماء عن طريق النتح أثناء موسم نمو واحد. وعلى الرغم من ذلك فإنه إذا لم يتم توفير الماء للنبات بكميات كافية فإن معدل نموه يقل، وإذا اشتد النتح، وزاد كثيرا عن كمية الماء الممتصة، فإن النبات يذبل، وإذا استمرت هذه الحالة لفترة طويلة فإن النبات يموت.

ويعتبر النتح هاما لانتقال وتوزيع الماء والعناصر المغذية إلى أجزاء النبات المختلفة، كما أن النتح يعطي النبات القوة الدافعة الرئيسية لامتصاص الماء من التربة ضد الجاذبية الأرضية، والمقاومة التي تواجهه داخل النبات.

وتحت الظروف العادية، فإن ٩٠% أو أكثر من الماء المفقود من النبات عن طريق النتح من الأوراق، يكون عن طريق الثغور Stomata، أما الكمية الباقية، فتفقد من خلال العديسات Lenticels، والأدمة Cuticle، وهذه الأنواع الثلاثة من النتح تسمى على التوالي، النتح الثغري Stomatal، والنتح العديسي Lenticular، والنتح الكيوتيني Cuticular.

العوامل المؤثرة على النتح والتبخر

تؤثر كثير من العوامل على النتح والتبخر، ويمكن تقسيمها إلى:

أ- عوامل بيئية Environmental factors

ب- عوامل خاصة بالنبات Plant factors

أ-العوامل البيئية المؤثرة على النتح والتبخر

إن أهم العوامل البيئية التي تؤثر على النتح والتبخر هي:

١-الأشعة الشمسية، ٢- درجة الحرارة، ٣- الرطوبة الجوية النسبية، ٤- الرياح.

١-الأشعة الشمسية

إن النتح يكون أسرع تحت ظروف الإضاءة الشديدة عنه في الظلام، ويرجع ذلك إلى أن بعض الأشعة الضوئية، تعمل على رفع درجة حرارة خلايا الورقة، وبذلك تزيد من معدل تحول الماء السائل إلى بخار، ولقد وجد أن الأشعة الشمسية الكلية، الممتصة بواسطة الورقة، يستعمل منها حوالي ١-٥% فقط، في عملية التمثيل الضوئي، ويستعمل حوالي ٧٥-٨٥% منها لرفع درجة حرارة الورقة والنتح، ولذلك فإنه كلما زادت شدة الإضاءة كلما زاد معدل النتح والتبخر.

كما أنه كلما زادت كمية الضوء التي تمتصه الأوراق، كلما زادت فتحة الثغر في الإتساع، وبالتالي، كلما زاد معدل النتح.

٢-درجة الحرارة

يؤدي إرتفاع درجة الحرارة (داخل المدى الحراري الفسيولوجي) إلى زيادة معدل النتح، ويرجع ذلك إلى تأثير الحرارة على فتح وقفل الثغور، وتدرج الجهد المائي بين الجو المحيط بالورقة، وبين الجو الداخلي لها. كما أن

إرتفاع درجة الحرارة، يعمل على زيادة قدرة الهواء على حمل مزيد من بخار الماء. ولقد وجد عموما، أن درجة حرارة الوراق، تزيد عن درجة حرارة الهواء المحيط بحوالي ٥-١٠ درجات مئوية.

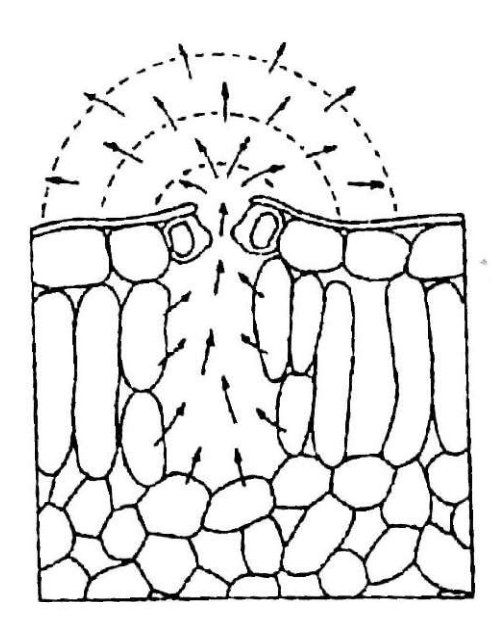
٣-الرطوبة النسبية

إن الجو الداخلي للورقة، يعتبر بصفة عامة مشبعا، أو قريب من التشبع، أي ذو جهد مائي مرتفع، وكلما زاد محتوى الماء في الهواء المحيط بالورقة، كلما زاد جهد الماء بهذا الهواء، وهذا يؤدي إلى نقص تدرج انحدار جهد الماء بين الورقة والهواء الخارجي، وهذا يؤدي إلى انتشار بخار الماء من الورقة إلى الهواء الخارجي، ولذلك فإنه، كلما زادت الرطوبة النسبية، كلما انخفض معدل النتح.

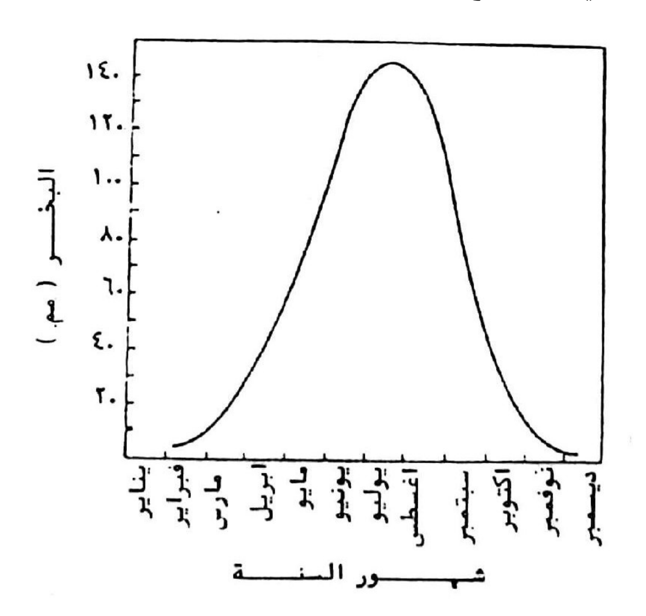
٤-الرياح

يحدث النتح، عندما ينساب الماء خلال الثغور، ويصبح الهواء حول الثغور، مشبعا أكثر فأكثر ببخار الماء، عندما يكون الهواء ساكنا، أو غير مضطرب (شكل ٩-٣)، وهذا يعني أن الماء المنتشر من الأجزاء الداخلية للورقة، يتناسب مع الماء الموجود خارج الورقة، وكلما زاد تركيز بخار الماء بالهواء المحيط بالثغر، كلما انخفض معدل النتح، وعتدما، يحدث اضطراب للهواء المحيط بالورقة، فإنه يعمل على إزالة الرطوبة، من المنطقة المحيطة بالثغر خارج الورقة، وهذا يعمل على إيجاد فرق في الجهد المائي داخل الورقة، وخارج الثغر المفتوح، وهذا يؤدي إلى زيادة صافي انتشار الماء من الورقة إلى الجو المحيط، وبالتالي زيادة النتح.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن أعلى نتح وتبخير، يكون في الوقت من العام الذي يكون فيه الإشعاع الشمسي، ودرجات الحرارة عند حدودها القصوى (شكل ٩-٤، وشكل ٩-٥).



شكل (٩-٣). انتشار الماء خلال فتحة الثغر، في حالة عدم حدوث اضطراب لطبقة الهواء الملاصقة للسطح الخارجي للورقة، وهذا يؤدي إلى نقص ممال الإنتشار، وبالتالي نقص النتح.



شكل (٩-٤). البخر من وعاء مكشوف، أثناء شهور السنة في المناطق المعتدلة.

٥- رطوبة التربة

يقل معدل النتح بسرعة، عندما يقل محتوى التربة من الماء، ويصبح نقص محتوى التربة من الماء أهم عامل من العوامل البيئية المؤثرة على النتح، ويرجع ذلك إلى أن معدل إمتصاص الماء بواسطة الجذور يؤثر على معدل النتح. وهنا تجدر الإشارة إلى أن كل العوامل الأرضية التي تؤثر على امتصاص الماء بواسطة المجموع الجذري، تؤثر بدورها على النتح، ومن هذه العوامل، نقص درجة حرارة التربة، وزيادة تركيز ملوحة التربة، وقلة التهوية حول الجذور. وإذا زاد معدل النتح، عن معدل الإمتصاص، فإن النبات يذبل،و في هذه الحالة يقل الجهد المائي للورقةعن مثيله المحيط بالورقة،فيقل النتح، كما سبق أن ذكرنا.

ب- الصفات الخاصة بالنبات التي تؤثر على النتح والتبخر

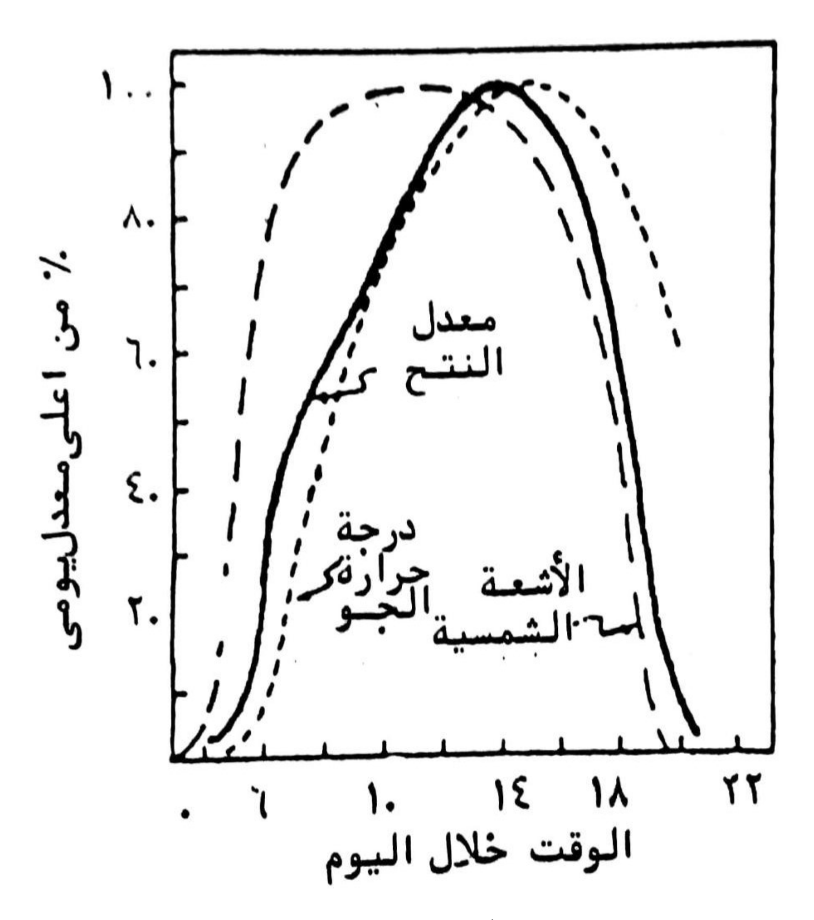
إن أهم الصفات الخاصة بالنبات، والتي تؤثر على النتح والتبخير هي: ١- فتح وقفل الثغور، ٢- حجم وعدد الثغور، ٣- مساحة السطح الورقي، ٤- التفاف وانثناء الأوراق، ٥- تعمق وحجم الجذور، نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري.

١- فتح وقفل الثغور

إن معظم النتح يحدث عن طريق الثغور، بسبب عدم النفاذية النسبية للكيوتيكل، كما سبق أن ذكرنا. ويحدث النتح بكمية قليلة جدا عند قفل الثغور، وكلما زادت درجة انفتاح الثغور، كلما ازداد فقد الماء، وهناك العديد من العوامل التي تؤثر على فتح وقفل الثغور، ولكن العوامل الرئيسية، تحت ظروف الحقل،هي الضوء والمحتوى الرطوبي، وفي معظم نباتات المحاصيل يسبب الضوء فتح الثغور، وأن نقص محتوى الرطوبة في الورقة (جهد مائي منخفض) يسبب فقد امتلاء الخلايا الحارسة مما يؤدي إلى قفل الثغر ونقص معدل النتح.

٢- عدد وحجم الثغور

إن معظم أوراق المحاصيل تحتوي على العديد من الثغور على سطحي الورقة. وأن عدد الثغور وحجمها، والتي تتأثر بواسطة كلا من التركيب الوراثي، والظروف البيئية، ذات تأثير أقل على النتح الكلي من تأثير فتح وقفل الثغور.



شكل (٩-٥). العلاقات اليومية بين الأشعة الشمسية ودرجة الحرارة والنتح والتبخير.

٣- مساحة السطح الورقي

يزداد النتح والتبخير بزيادة مساحة السطح الورقي، ولقد وجد أن النتح والتبخير، يزداد بزيادة دليل مساحة الأوراق، حتى يصل دليل مساحة الأوراق إلى قيمة يمكن للأوراق عندها إعتراض ٨٠% من الأشعة الساقطة على النباتات، ولا تحدث زيادة في النتح والتبخير عن هذا الحد.

٤- التفاف وانثناء الأوراق

هناك العديد من النباتات التي لديها آليات في الأوراق تعمل على نقص النتح والتبخير، وذلك عندما يصبح الماء محدودا، إذ تلجأبعض النباتات النجيلية إلى تقليل النتح عن طريق تقليل مساحة السطح الورقي المعرض

للشمس، وذلك عن طريق التفاف الأوراق، كما هو الحال في نباتات الذرة الشامية، والذرة الرفيعة، ويرجع ذلك إلى وجود حزم من الخلايا اللافة على السطح العلوي للورقة، والتي تسبب التفاف أو عدم إلتفاف الأوراق، عن طريق التغير في انتفاخها. ويعمل التفاف الأوراق على انقاص معدل النتح بمقدار يتراوح بين ٣٥-٧٥%، متوقفا ذلك على نوع النبات، والمنطقة النامي فيها. أما في النباتات ذات الأوراق العريضة، مثل فول الصويا، فتعمل النباتات على تقليل فقد الماء عن طريق انثناء الأوراق من الخارج إلى الداخل، مما يعمل على تعريض السطح السفلي للورقة، والذي يحتوي على شعيرات شفافة لامعة للشمس وهذه الشعيرات يمكنها أن تعكس كمية أكبر من الضوء، وبالتالي تقليل معدل النتح.

ولقد وجد، أن أقصى نتح وتبخير يحدث أثناء فترة الظهيرة، عندما تكون درجة حرارة الهواء عالية، وأيضا شدة الإضاءة عالية، وأن النتح والتبخير اليومي، يبدأ في النقصان بعد الظهر، ويرجع ذلك أساسا إلى نقص كلا من الطاقة الضوئية ونقص درجة الحرارة (شكل ٩-٥).

٥- تعمق وحجم الجذور

إن يسر وامتصاص الرطوبة الأرضية بواسطة المحصول، يعتمد بدرجة كبيرة على عمق الجذور وحجمها، إذ أن الجذور المتعمقة، تزيد من يسر الماء، وأن زيادة حجم الجذور (حجم الجذور لكل وحدة حجم من التربة) تعمل على زيادة استخلاص الماء من وحدة حجم التربة، قبل أن يحدث الذبول الدائم.

٦- نسبة المجوع الجذري إلى المجموع الخضري

تحت الظروف المثلى للنتح، فإن كفاءة كلا من سطح الامتصاص (سطح الجذر) والسطح الناتج (سطح الورقة) يصبحان هما العاملان المتحكمان في معدل النتح. فإن كان امتصاص الماء أقل من مثيله الذي يفقد عن طريق النتح، فسوف يعاني النبات من نقص الماء داخله، وبالتالي سوف يعمل على تقليل النتح، ولقد وجد أن النتح يزداد بزيادة نسبة الجذر إلى الساق.

بعض وسائل تقليل النتح والتبخير

يستخدم المزارعون وكل المهتمون بالزراعة، على نطاق واسع، وسائل معينة للحد من فقد الماء من النبات والتربة ومن أكثرها انتشارا:

١- مقاومة الحشائش النامية مع المحصول، إذ أن الحشائش، كأي نبات آخر يقوم بعملية النتح، وبذلك فإنها تسبب تبديد جزءا من ماء التربة، والذي يمكن استخدامه بواسطة المحصول المنزرع.

٢- تقليم الأوراق، فعند زراعة بعض النباتات بطريقة الشتل، فإنه تجرى عملية تقليم للأوراق، وهذا يؤدي إلى تقليل مساحة السطح الورقي، وبالتالي تقليل النتح، وهذا يؤدي إلى عملية توازن الماء الممتص مع الماء المفقود عن طريق النتح.

٣- زراعة مصدات للرياح من الأشجار حول الحقول، وخصوصا في المناطق الصحراوية، يعمل على تقليل سرعة الرياح الحارة، وبذلك يمكن تحاشي النتح الزائد من أوراق النباتات المنزرعة وراء مصدات الرياح.

٤- استخدام المواد المانعة (المضادة) للنتح، وهي مواد ترش على أوراق النباتات، بغرض تقليل النتح. ويمكن تقسيم مضادات النتح على حسب ميكانيكية فعلها إلى الآتي:

أ- مضادات نتح تثبط فتح الثغور، وتتميز المواد التابعة لهذه المجموعة، بأنها تعمل على قفل الثغور عندما ترش على النبات بتركيزات منخفضة، ومثل هذه المواد تثبط انفتاح الثغور لمدة أربعة أيام على الأقل دون احداث سمية لكثير من الأنواع النباتية. ومن أهم المواد التابعة لهذه المجموعة هي مادة Phenylmercuric acetate (PMA).

ب- مضادات نتح تكون عند رشها على النباتات فيلما (غشاءا) رقيقا يعمل كحاجز طبيعي، يمنع فقد الماء من النبات. ومن أمثلة هذه المواد، مادة تجارية يطلق عليها Mobileaf، وهي عبارة عن مستحلب شمعي.

جـ- مواد مثبطة للنتح، تكون طبقة عاكسة على سطح الورقة، وهذه تعمل على خفض درجة حرارة الورقة، وتقلل من ممال الضغط البخاري من الورقة إلى الجو المحيط بها، ومن أمثلة هذه المواد مادة الكاولينيت.

عموما- يمكن القول، أن تقليل النتح نتيجة لاستخدام مثبطات النتح، يعتبر مفيدا للنباتات، بشرط أن لا يصاحب ذلك نقصا في عملية التمثيل الضوئي، ولكن هذا غير ممكن، لأن الغشاء الرقيق الذي يتكون على سطح أوراق

النباتات، نتيجة استخدام مضادات النتح، يكون غير منفذ لكل من الماء والغازات وخصوصا غاز CO_2.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن مضادات النتح، لم تنتشر من الناحية التطبيقية، لأنها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الورقة، ونقص امتصاص وانتقال العناصر الغذائية داخل النبات، وذلك نتيجة لنقص النتح، ونقص انتشار غاز CO_2 إلى داخل الورقة، نتيجة لقفل الثغور.

٥- يمكن تقليل فقد الماء من سطح التربة، عن طريق تقليل التبخير، وذلك باستعمال مواد التغطية Mulches، وهي المواد التي تستعمل لتغطية سطح التربة، بغرض تقليل فقد الماء بالتبخير أساسا، بالإضافة إلى الحد من نمو الحشائش، وتجانس حرارة التربة خلال النهار، ومن أمثلة مواد التغطية، مخلفات المحاصيل مثل قش الأرز، وحطب القطن، والذرة الشامية، والذرة الرفيعة، وغيرها. وقد يستعمل البيتموس لهذا الغرض، كما يستعمل الورق العادي والذي يوجد على شكل لفائف. كما يستخدم في التغطية، البلاستيك المصنوع من البولي إيثيلين.

وعلى الرغم من أن مثل هذه الأغطية ذات كفاءة عالية في الحد من التبخر من سطح التربة، وكذلك في الحد من نمو الحشائش، إلا أنها لا تستعمل عادة لمعظم محاصيل الحقل، بل تستعمل عادة في حالة المحاصيل التي تزرع في سطور أو خطوط، وخصوصا الصيفية.

وعند استعمال مواد التغطية، فإنها تنشر وتثبت بين الصفوف أو السطور أو الخطوط، أو تنشر على سطح الأرض كله، وفي الحالة الأخيرة فإنه يتم زراعة المحصول خلال فتحات مناسبة في الغطاء.

ولقد وجد المؤلف، أن استعمال قش الأرز والبلاستيك في تغطية التربة المنزرعة بمحصول الذرة الرفيعة الحبوب في أرض رملية، قد أدى إلى زيادة محتوى التربة من الرطوبة، ونقص نمو وانتشار الحشائش، بالمقارنة بالأرض الغير مغطاة، ويرجع ذلك إلى نقص فقد الماء بالتبخير من سطح التربة.

النتح والتبخير الكامن Potential Evaportranspiration (PET)

يعرف النتح والتبخير الكامن PET بأنه عبارة عن مقدار النتح والتبخير من سطح الأرض المغطى تماما بالكساء الخضري، مع توافر الرطوبة الأرضية باستمرار. ويمكن تقدير PET عن طريق البخر من وعاء مكشوف (شكل ٩-٤).

وعموما- لا تظل معظم محاصيل الحقل عند النتح والتبخير الكامن طول موسم نموها، لأن الكساء الخضري للمحصول في بعض الفترات خلال دورة حياته، لا يغطي سطح الأرض تماما، كما هو الحال في طور البادرات، بالإضافة إلى أن الأرض لا تكون قادرة على تعويض الماء الذي يفقد بالنتح بالنبات، إذ أن النباتات الحولية، تكون ذات مساحة ورقية صغيرة جدا في بداية حياتها، ثم تزداد بتقدم النباتات في العمر، وحيث أن نباتات المحاصيل تنمو بسرعة تحت ظروف درجات الحرارة المرتفعة وشدة الإضاءة العالية، وأن أعلى مساحة أوراق على النبات تكون أثناء أعلى PET ، ولذلك فإن ذروة الاحتياج المائي للمحاصيل الصيفية تكون في منتصف الصيف، كما هو مبين بشكل (٩-٤).

الاحتياجات المائية

إن جميع النباتات الخضراء، لكي تنمو وتكون مادة جافة، يجب أن تمتص كمية من الماء، أكبر من كمية المادة الجافة التي تكونها، وحتى عهد قريب، كان يعبر عن الاحتياج المائي Water requirement أو نسبة النتح Transpiration ratio بأنه عبارة عن مقدار الماء بالوزن الذي يفقده النبات بالنتح لبناء جراما واحدا من مادته الجافة. وعلى سبيل المثال، نسبة النتح للذرة الشامية ٣٥٠، هذا يعني أن ٣٥٠ جراما من الماء يلزم لتكوين جراما واحدا من المادة الجافة لنباتات الذرة الشامية، وتقدر نسبة النتح من المعادلة الآتية:

$$\text{نسبة النتح} = \frac{\text{مقدار النتح الكلي طول حياة النبات}}{\text{الوزن الجاف الكلي للنبات}}$$

وتختلف نباتات محاصيل الحقل في نسبة النتح، كما تختلف الأصناف داخل النوع الواحد في ذلك، كما تختلف نسبة النتح لمحصول من منطقة لأخرى، إذ يقل في المناطق الرطبة، عنه في المناطق ذات المناخ الجاف، ويرجع اختلاف المحاصيل المختلفة، في نسبة النتح، إلى اختلاف هذه المحاصيل في حجم مجموعها الخضري، وعدد الثغور بسطح الورقة، وسمك الطبقة الشمعية على السيقان والأوراق، وغيرها من الصفات المورفولوجية، والفسيولوجية.

وعموما- لا تعبر نسبة النتح، تعبيرا صادقا على كمية الماء اللازمة للمحصول، تحت ظروف الحقل، وذلك لأن نسبة النتح تقدر غالبا في اواني (أصص أو ليزيمترات، أو غيرها) تحت ظروف الصوبة الزجاجية مع تغطية سطح التربة لمنع البخر، ولذلك فإن حجم الوعاء المنزرع فيه المحصول، ونوع التربة، وكلا من العوامل البيئية والعوامل الخاصة بالنبات، تؤثر على نمو المحصول، وبالتالي على نسبة النتح، مما يؤدي إلى أن النتائج المتحصل عليها تختلف من باحث لآخر، ومن منطقة لأخرى على نفس المحصول. ولذلك فتعتبر نسبة النتح ذات أهمية قليلة، عند تصميم أو وضع خطة للري، تحت ظروف الحقل، ولذلك فإنها لم تعد تستخدم الآن، ولكن تستخدم اصطلاحات أخرى أكثر شمولا ودقة، وأهمها ما يلي:

النتح والتبخير Evapotranspiration

هو عباره عن ما تفقده الأرض، والأسطح الخارجية للنبات من ماء، كما سبق أن ذكرنا. وعند تقدير الاحتياج المائي للمحصول، فقد تم ضم كلا من النتح والتبخير معا، لأنه من الصعب فصل فقد الماء عن طريق كلا من النتح والتبخير، تحت ظروف الحقل المنزرع بالمحصول.

الاستهلاك المائي Consumptive use

هو عبارة عن مقدار ما تفقده الأرض والأسطح الخارجية للنبات من ماء، بالاضافة إلى مقدار ماتحتفظ به الأنسجة النباتية من ماء، ولما كان مقدار الماء الذي يحتجزه النبات بأنسجته لا يتجاوز ٢% من كمية الماء الكلية التي يمتصها، فإن البعض يعتبر الاستهلاك المائي مساويا تقريبا لمقدار النتح والتبخير.

وأن كمية الماء الكلية المستعملة بوسطة النتح والتبخير، بواسطة المحصول المنزرع، في مساحة معينة، تحت ظروف الحقل، أثناء موسم النمو، يطلق عليه الاستهلاك المائي الموسمي.

ويعبر عن كلا من الاستهلاك المائي والنتح والتبخير، بعمق الماء بالسنتيمترات أو البوصة، أو بالأمتار المكعبة/ فدان.

كفاءة استخدام الماء Water use efficiency

إن كفاءة استخدام الماء WUE لمحاصيل الحقل، تعرف بأنها عبارة عن كمية المادة الجافة المنتجة، بواسطة وحدة من الماء المستهلك في النتح والتبخير، وتقدر من المعادلة الآتية:

$$\text{كفاءة استخدام الماء} = \frac{\text{كمية المادة الجافة المنتجة}}{\text{كمية الماء المفقودة عن طريق النتح والتبخير}}$$

ويعبر عن كفاءة استخدام الماء بـ: جرام مادة جافة/ كجم ماء أو كجم مادة جافة/ فدان/ سم ماء. ويمكن استبدال المادة الجافة المنتجة بالمحصول الإقتصادي في المعادلة السابقة.

الاحتياج المائي Water requirement

هو عبارة عن كمية الماء المفقودة عن طريق النتح والتبخير، لتكوين جراما واحدا من المادة الجافة بالنبات، ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\text{الاحتياج المائي} = \frac{\text{كمية الماء المفقودة عن طريق النتح والتبخير}}{\text{كمية المادة الجافة المنتجة}}$$

ويعبر عن الاحتياج المائي بـ: جرام ماء/ جرام مادة جافة.

عموما- تختلف محاصيل الحقل المختلفة اختلافا كبيرا في كفاءتها في استخدام الماء، وفي احتياجها المائي.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن أي عملية زراعية، تؤدي إلى زيادة المحصول بدون زيادة معنوية في النتح والتبخير، فإنها سوف تؤدي إلى زيادة كفاءة استخدام الماء، ومن هذه العمليات الزراعية، التسميد، ومقاومة الحشائش والآفات الأخرى التي تهاجم المحصول، وتحسين عمليات خدمة المحصول، والزراعة في المواعيد المثلى، وزراعة الأصناف المحسنة. إن كل العمليات الزراعية السابقة، قد أدت إلى زيادة كلا من المحصول وكفاءة استخدام الماء. ولقد وجد أيضا أن كفاءة المحصول في استخدام الماء تزداد بزيادة خصوبة التربة.

إن النباتات رباعية الكربون ذات كفاءة أعلى في استخدام الماء من النباتات ثلاثية الكربون، إذ وجد أن كفاءة استخدام الماء في النباتات الرباعية الكربون، أعلى عنه في النباتات ثلاثية الكربون بمقدار الضعف، سواء في النباتات النجيلية أو النباتات ذات الفلقتين، كما هو مبين بجدول (٩-١). ويرجع السبب في ارتفاع كفاءة استخدام الماء، للنباتات رباعية الكربون عن النباتات ثلاثية الكربون، إلى ارتفاع معدلات التمثيل الضوئي، ومعدلات النمو تحت كل من شدة الإضاءة، ودرجة الحرارة العاليتين، ولذلك فإنه يمكن زيادة كفاءة استخدام الماء، عن طريق زراعة النباتات رباعية الكربون، في المناطق أو المواسم ذات الإضاءة العالية، أو زراعة النباتات ثلاثية الكربون في المناطق أو المواسم ذات المناخ المعتدل الرطب.

جدول (٩-١). كفاءة الاستفادة بالماء (جم مادة جافة/ كجم ماء) للنباتات رباعية الكربون، والنباتات ثلاثية الكربون

نوع النبات	نباتات نجيلية	نباتات ذات فلقتين
نباتات ثلاثية الكربون	١.٤٩	١.٥٩
نباتات رباعية الكربون	٣.١٤	٣.٤٤

(عن جاردنر، وآخرون، ١٩٨٥).

وفي بعض أنواع المحاصيل، يتأثر النتح والتبخير، تحت ظروف الحقل بواسطة الظروف البيئية، وحجم الكساء الخضري، ويسر الماء، بدرجة أكبر عن تأثره بنوع المحصول المنزرع. ويبين جدول (٩-٢) أن النتح والتبخير اليومي للمحاصيل المختلفة، يتراوح بين ٢.٤-٥.٧ مم/ يوم (Jensen, 1973).

وأن العوامل الرئيسية التي تؤثر على ET للأنواع النباتية المختلفة (مع بقاء يسر الماء عاليا) هو الوقت من السنة (الظروف البيئية)، ومعدل نمو الكساء الخضري للمحصول وتغطيته لسطح التربة. وأن معامل الاستهلاك المائي (K) والذي يمكن حسابه من المعادلة الآتية:

$$\text{معامل الإستهلاك المائي} = \frac{\text{النتح والتبخير الفعلي}}{\text{النتح والتبخير الكامن}}$$

يتراوح بين ٠.٦٥ – ٠.٨٧، ويتأثر أساسا بواسطة الكساء الخضري للمحصول خلال فترة النمو. وأن القمح ذو K منخفض لأنه ينو في جو بارد نسبيا كما أن معدل تكوين الأوراق في بداية حياة النبات بطئ نسبيا أيضا، وعلى العكس من ذلك، في حالة البرسيم الحجازي، فإن معامل إستهلاكه المائي مرتفع، لأنه يكون مساحة ورقية بمعدل أسرع بالرغم من أنه يحش أثناء السنة، فإن له القدرة على إعادة تكوين مساحة ورقية كبيرة بسرعة، عن طريق المواد الكربوهيدراتية المخزنة في الجذور وفي منطقة التاج الجذري، ولذلك فإنه يغطي سطح الأرض لفترة أطول أثناء موسم النمو. أما بالنسبة للذرة الرفيعة، وفول الصويا فإن معامل إستهلاكهما المائي متوسط، لأنهما ينموان في جو الربيع والصيف الدافئ، ولكن معدل تكوينهما مساحة سطح ورقي في بداية حياة النبات بطيئة نسبيا.

ويبين جدول (٩-٢) الاستهلاك المائي، والمادة الجافة المنتجة لستة محاصيل، تحت ظروف مائية مثلى.

جدول (٩-٢). استخدام الماء وانتاج المادة الجافة في ستة محاصيل حقل تحت ظروف ري مثلى.

المحصول	طول فترة النمو (يوم)	معامل الإستهلاك المائي	النتح بخر		انتاج المادة الجافة		الاحتياج المائي (جم ماء/ جم مادة جافة)	كفاءة استخدام الماء (جم مادة جافة/ كجم ماء)
			طول الموسم (مم)	المتوسط اليومي (مم)	طول الموسم (كجم/ هكتار)	المتوسط اليومي (كجم/ هكتار		
الذرة الشامية	١٣٥	٠.٧٥	٦٥٨	٤.٩	١٧٠٠٠	١٢٦	٣٨٨	٢.٥٨
الذرة الرفيعة	١١٠	٠.٧٨	٥٨٣	٥.٣	١٤٥٠٠	١٣٢	٤٠٢	٢.٤٩
القمح	١١٢	٠.٦٦	٤٧٣	٤.٢	٧٧٠٠	٦٩	٦١٣	١.٦٣
فول الصويا	١١٣	٠.٧٨	٥٩٩	٥.٣	٨٥٠٠	٧٥	٧٠٤	١.٤٢
بنجر السكر	١٩٠	٠.٧٢	٨٧٦	٤.٦	١٤٥٠٠	٧٦	٦٠٦	١.٦٥
البرسيم الحجازي	١٩٥	٠.٨٧	١١١٣	٥.٧	١١٢٠٠	٥٧	٩٩٣	١.٠١

عن: Jensen, 973

لقد أدى تحسين العمليات الزراعية وبرامج التربية، إلى زيادة كفاءة استخدام الماء بنباتات محاصيل الحقل، وأن معظم هذه الزيادة تأتي من زيادة مساحة السطح الورقي (والذي يزيد من النتح، وينقص التبخير، وزيادة اعتراض الضوء الساقط على النبات، والذي يؤدي إلى زيادة التمثيل الضوئي) وزيادة الماء الميسر، بسبب تعمق الجذور و/ أو زيادة القدرة على استخلاص الماء، وزيادة دليل الحصاد.

إحتياجات الري أو المقنن المائي

تعرف احتياجات الري أو المقنن المائي لمحصول ما، بأنها عبارة عن كمية ماء الري التي تعطى للفدان المنزرع بالمحصول، أثناء حياته من الزراعة حتى آخر رية، ويقدر عادة بالأمتار المكعبة.

ويشمل المقنن المائي للمحصول كمية الماء التي تفقد عن طريق البخر والتسرب إلى باطن الأرض، بعيدا عن مجال نمو الجذور، والفقد السطحي الناتج عن عدم العناية بتسوية سطح التربة، أو عدم العناية بتخير طريقة الري المناسبة، والفقد بواسطة الحشائش، والنباتات الغير اقتصادية النامية مع المحصول. ولذلك، فإنه لزيادة كفاءة الري، يجب العمل على منع أو تقليل فقد الماء بسبب هذه العوامل.

ويمكن تقدير احتياجات الري أو المقنن المائي لمحصول ما، في منطقة معينة، طبقا للمعادلة الآتية:

المقنن المائي = (الاستهلاك اللمائي للمحصول + مقدار الفقدالحتمي من المصادر السابقة) – (كميات المطر + الكسب المائي من المياه الجوفية التي قد يستفيد منها النبات)

ويبين جدول (٩-٣) المقنن المائي، لبعض محاصيل الحقل ويتضح من الجدول، أن المقنن المائي للمحاصيل، يزداد بارتفاع درجة الحرارة، وانخفاض الرطوبة النسبية، وذلك بالاتجاه من الوجه البحري إلى مصر العليا.

جدول (٩-٣). المقنن المائي لبعض محاصيل الحقل بمناطق الوجه البحري، ومصر الوسطى، ومصر العليا (متر مكعب ماء/ فدان/ موسم)

المحصول	الوجه البحري	مصر الوسطى	مصر العليا
محاصيل شتوية			
القمح	١١٠	١٤٨٠	١٩٨٠
الشعير	١٠٠٠	١٣٤٠	١٨٠٠
الفول	٨٠٠	١٠٥٠	١٤٤٠
العدس	٩٠٠	١١٠٠	١٥٠٠
الحمص	١٠٠٠	١٣٤٠	١٨٠٠
الترمسس	١٠٠٠	١٢١٠	١٦٢٠
الحلبة	٩٠٠	١٢١٠	١٦٢٠
الكتان	١٢٠٠	١٦١٠	١٦١٠
البرسيم التحريش	١٠٠٠	١٣٤٠	١٨٠٠
البرسيم المستديم	٢٥٠٠	٣٣٥٠	٤٥٠٠
البصل	١٧٠٠	٢٢٨٠	٣٠٦٠
محاصيل صيفية			
الأرز	٧٥٥٠	٩٥٠٠	ــــ
الذرة الشامية	٢٥٠٠	٣١٥٠	٤٥٠٠
الذرة الرفيعة	٢٥٠٠	٣١٥٠	٤٥٠٠
القطن	٣٠٠٠	٣٧٦٠	٥٤٠٠
قصب السكر	١٠٤٠٠	١٧١٠٠	١٨٧٠٠
الفول السوداني	٢٥٠٠	٣١٠٠	٣١٥٠
السمسم	٢٥٠٠	٣١٥٠	٤٥٠٠
محاصيل نيلية			
الأرز	ــــ	٧٥٠٠	ــــ
الذرة الشامية	٢٣٠٠	٢٩٢٠	٤١٤٠
الذرة الرفيعة	٢٣٠٠	٢٩٢٠	٤١٤٠
البصل	١٧٠٠	٢٢٨٠	٣٠٦٠

الإجهاد الرطوبي Water stress

إن الإجهاد الرطوبي أو نقص الماء Water deficit بالنبات يحدث عندما يقل محتوى الخلايا من الماء إلى أقل من مستواه العادي، وهذا يحدث عندما يكون فقد الماء من النبات عن طريق النتح، يزيد عن مقدار الماء الممتص بواسطة جذور النبات، كما يحدث أيضا نتيجة للنقص التدريجي في كمية الماء الميسر للإمتصاص بواسطة النبات.

وعموما- يوجد ثلاث عوامل رئيسية تتسبب في نشوء الإجهاد المائي بالنبات هي، معدل النتح، ومعدل حركة الماء خلال التربة إلى الجذور،

وعلاقة الجهد المائي للتربة بالجهد المائي للورقة. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الجهد المائي للتربة، والذي يحدث عنده الذبول الدائم، يعتمد على الجهد المائي الذي تذبل عنده الأوراق، ولذلك فإن الذبول الدائم ليس صفة خاصة بالتربة، ولكنه يتحدد بالصفات الأسموزية للنبات. وعموما، يحدث الذبول الدائم عند جهد مائي للتربة قدره -١٥ بار، لأن النباتات تذبل عند هذا الجهد المائي.

عموما- تصل النباتات إلى نقطة الذبول بعد الري بفترة تتراوح بين أسبوع في الأراضي الرملية، إلى أربعة أسابيع في الأراضي الطينية، وقد تكون الفترة أطول إذا كانت جذور النباتات متعمقة.

وتختلف شدة الإجهاد الرطوبي، فقد يكون منخفضا، أي قد لا يكون واضحا على النباتات، ولكن يمكن التعرف عليه فقط عن طريق قياسه بواسطة أجهزة قياس خاصة، وقد يكون الإجهاد الرطوبي أكثر شدة عن الحالة السابقة، بحيث يؤدي إلى ذبول مؤقت للنباتات وذلك في فترة الظهيرة، وقد يكون الإجهاد الرطوبي شديد جدا، بحيث يؤدي إلى ذبول دائم، وإذا استمر على ذلك فيسبب موت النباتات بسبب فقد الماء من الخلايا (التجفيف).

تأثير الإجهاد الرطوبي على نباتات محاصيل الحقل

إن مقدار الضرر الذي يتسبب عن الاجهاد الرطوبي لنباتات محاصيل الحقل، يعتمد إلى حد كبير على طور نمو النبات، الذي يحدث فيه الإجهاد الرطوبي، وكذلك على طول فترة الإجهاد الرطوبي. ويمكن تقسيم دورة حياة النبات إلى ثلاثة أطوار (مراحل) هي: ١- مرحلة انبات البذور وتكشف البادرات، ٢- مرحلة النمو الخضري، ٣- مرحلة النمو الثمري، وسوف نناقش فيما يلي، تأثير الإجهاد الرطوبي على كل مرحلة من هذه المراحل في حياة نباتات محاصيل الحقل.

أ- الإنبات وتكشف البادرات

يؤدي الإجهاد الرطوبي (نقص الماء الأرضي) إلى تثبيط انبات بذور نباتات محاصيل الحقل (راجع الباب الثامن)، وكذلك تكشف البادرات. وبوجه عام، تختلف المحاصيل المختلفة، في قدرتها على الإنبات تحت ظروف الإجهاد الرطوبي، وعلى سبيل المثال، وجد أن بذور زهرة الشمس، يمكنها أن تنبت في درجات الرطوبة المنخفضة، أو بمعنى آخر في ترب أكثر جفافا بالمقارنة بمحاصيل أخرى مثل بنجر السكر والذرة.

ب- مرحلة النمو الخضري

إن النمو الخضري بوجه عام، وزيادة مساحة الأوراق بوجه خاص يثبط بدرجة شديدة بواسطة الإجهاد الرطوبي المحدود، كما هو مبين بشكل (٩-٦). وأن كل العمليات المسئولة عن النمو تتأثر بالإجهاد الرطوبي، ولكن بدرجات متفاوتة، وأن التأثير العام الأكثر وضوحا للإجهاد الرطوبي هو نقص حجم النبات ونقص المحصول. وأن نمو النبات يعتمد أساسا على إنقسام الخلايا وزيادتها في الحجم، وتكشف كلا من المجموع الخضري والثمري، ونمو الجذور (نسبة المجموع الجذري إلى الخضري)والتكشف (التخصص)، وسوف نناقش فيما يلي تأثير الإجهاد المائي عليها.

١- انقسام الخلايا وزيادتها في الحجم (نمو الخلايا)

إن كلا من انقسام الخلايا وزيادتها في الحجم (نموها) يتأثران بالإجهاد المائي، ولكن بوجه عام، يؤدي الإجهاد المائي إلى تثبيط زيادة الخلايا في الحجم (نموها) بدرجة أكبر من تثبيطه لانقسام الخلايا. ولقد وجد أن زيادة الخلايا في الحجم، يثبط أو يوقف تماما قبل أن يحدث نقصا كبيرا في عملية التمثيل الضوئي، كما وجد أن نمو الورقة (زيادة مساحة سطحها) يثبط غالبا، أو يوقف، قبل أن يثبط معدل التمثيل الضوئي بدرجة واضحة (شكل ٩-٦).

٢- نسبة المجموع الجذري إلى الخضري

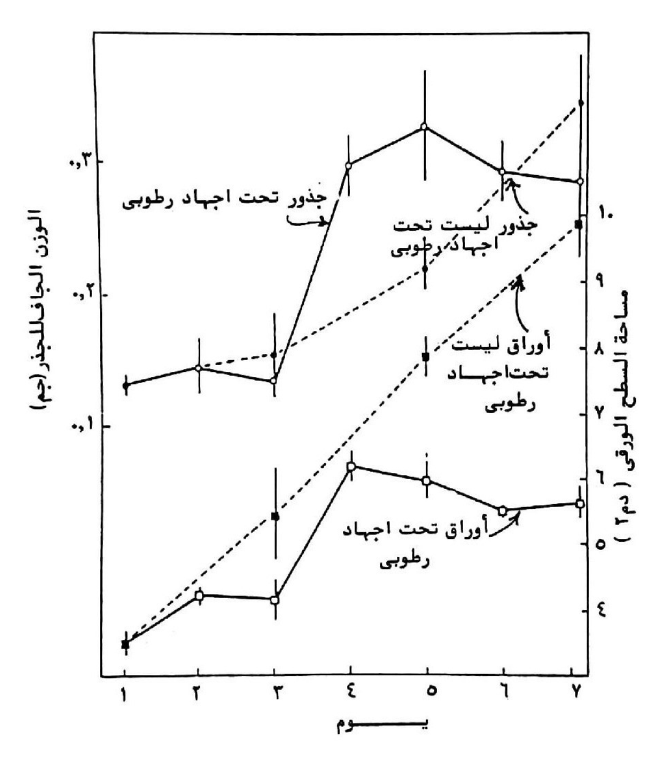
يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى نقص كلا من المجموع الخضري، والجذري، ولكن النقص في المجموع الخضري يكون أكبر عنه في المجموع الجذري، ولذلك فإن نسبة المجموع الجذري إلى الخضري، تزداد، بزيادة الإجهاد الرطوبي الذي تتعرض له النباتات.

وفي بعض الحالات، تكون هناك زيادة في كمية الجذور المتكونة في النباتات المعرضة إلى إجهاد رطوبي محدود، وقد يرجع ذلك إلى قدرة الجذور على تعديل الأسموزية، وذلك بالمقارنة بالمجموع الخضري (Sharpe and Davies, 1979)، ويبين شكل (٩-٥) تأثير تجفيف التربة، على الوزن الجاف للجذور، ومساحة السطح الورقي في محصول الذرة الشامية. ويلاحظ من الشكل، أن الإجهاد الرطوبي المحدود، أدى إلى إيقاف الزيادة في مساحة السطح الورقي، ولكن في نفس الوقت، استمرت الجذور في النمو. ومن الملاحظ أن هذا يحدث عندما تتعرض النباتات إلى إجهاد رطوبي محدودبالتربة، والذي يؤدي إلى تثبيط نمو المجموع الخضري بنسبة أكبر من

تثبيطه لعملية التمثيل الضوئي، والذي ينتج عنه وجود فائض في المواد الكربوهيدراتية، والتي تكون متاحة (ميسرة) لنمو الجذور.

٣- التكشف (التخصص)

هناك نوعين من التكشف في نباتات محاصيل الحقل، هما التكشف الخضري، والتكشف الثمري، ويؤثر الإجهاد الرطوبي على التكشف الخضري عن طريق نقص تكشف أوراقا جديدة، وزيادة معدل شيخوخة الأوراق، ولذلك فإن الإجهاد الرطوبي يسبب نقصا شديدا في مساحة التمثيل الضوئي، وكذلك نقص في معدل عملية التمثيل الضوئي لكل وحدة مساحة من السطح الورقي.



شكل (٩-٦). تأثير تجفيف التربة على الوزن الجاف للجذور، ومساحة السطح الورقي في الذرة الشامية. يلاحظ أن الإجهاد الرطوبي المحدود يوقف الزيادة في مساحة السطح الورقي، بينما يؤدي إلى زيادة نمو الجذور.

وأن تأثير الإجهاد الرطوبي على التكشف الثمري (التكاثري) يكون أكبر من تأثيره على التكشف الخضري، إذ يعمل الإجهاد الرطوبي في المحاصيل النجيلية مثل القمح على تثبيط استطالة السنبلة وتثبيط تكوين السنيبلات، وإذا حدث الإجهاد الرطوبي عند تفتح المتك، فإنه يسبب نقص الإخصاب وعقد البذور، وأن عدد وحجم الحبوب يقل. ولقد وجد أن الإجهاد الرطوبي أثناء استبداء تكوين الأزهار في فول الصويا يؤدي إلى نقص طول فترة الإزهار، ويسبب سقوط نسبة من الأزهار المتكونة.

تأثير الإجهاد الرطوبي على العمليات الفسيولوجية بالنبات

يؤثر الإجهاد الرطوبي على العديد من العمليات الفسيولوجية الهامة بالنبات، مثل التمثيل الضوئي، والتنفس الظلامي، والانتقال، وتقسيم (توزيع) ناتجات التمثيل الضوئي على أعضاء النبات المختلفة، وامتصاص اللعناصر الغذائية، وقفل الثغور، وسوف نناقش فيما يلي تأثير الإجهاد الرطوبي على هذه العمليات الفسيولوجية.

١- التمثيل الضوئي

يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى نقص معدل التمثيل الضوئي للنباتات، وعلى سبيل المثال، وجد أن معدل التمثيل الضوئي في بعض نباتات محاصيل الحقل، يقل بمقدار ٥٠%، عندما سمح للتربة أن تجف تدريجيا، ابتداءا من السعة الحقلية حتى ظهور الذبول على النباتات، وعندما هبط المحتوى الرطوبي للتربة، إلى النسبة المئوية الخاصة بالذبول المستديم وذبول الأوراق ذبولا واضحا، قد انخفض معدل التمثيل الضوئي بمقدار ٧٨% عن المعدل الأصلي. ويرجع النقص في معدل التمثيل الضوئي لنباتات محاصيل الحقل، نتيجة للإجهاد الرطوبي إلى نقص مساحة السطح الورقي، وقفل الثغور، ونقص كفاءة تثبيت غاز CO_2. وأن نقص مساحة السطح الورقي تعتبر من الأسباب الرئيسية لنقص المحصول في نباتات المحاصيل التي تتعرض للإجهاد الرطوبي. ولقد وجد أيضا أن تجميع المواد الكربوهيدراتية عند نقص معدل النمو الذي يحدث نتيجة الإجهاد الرطوبي، قد يسبب نقصا في معدل التمثيل الضوئي.

ولقد وجد Keck و Boyer عام ١٩٧٤، أن الإجهاد الرطوبي يثبط الفسفرة الضوئية، وانتقال الإلكترونات في تفاعلات الضوء، وذلك في البلاستيدات الخضراء المعزولة من أوراق نباتات زهرة الشمس.

ولقد وجد أيضا أن الإجهاد الرطوبي، يثبط نشاط تفاعلات الظلام في عملية التمثيل الضوئي، نتيجة لتثبيط نشاط الانزيمات التي تحفز هذه التفاعلات، والمثال على ذلك إنزيم Riboluse-1-5-biphosphate Carboxylase وانزيم Riboluse-5-biphosphate Kinase وغيرها.

وفي هذا المجال وجد أن إنزيمات الكربكسلة في نباتات القمح البري، تظل نشطة تحت جهد مائي منخفض والذي يسبب تثبيط نفس الإنزيمات في القمح المنزرع، وهذا يدل على أنه في القمح البري (المقاوم للجفاف) يكون النشاط الإنزيمي أكثر تحملا للجفاف عنه في القمح المنزرع.

ولقد وجد أيضا أن الإجهاد الرطوبي يسبب تثبيط تكوين الكلوروفيل، كما تؤدي زيادة الإجهاد الرطوبي إلى هدم الكلوروفيل.

عموما- تختلف الأنواع النباتية المختلفة، كما تختلف الأصناف داخل النوع الواحد عن بعضها، في مدى تأثر عملية التمثيل الضوئي بها بالإجهاد الرطوبي، كما توجد إختلافات كبيرة بين نفس نباتات المحصول النامية في الحقل، ومثيلتها النامية في الصوبة في أصص.

٢- التنفس الظلامي

يقل معدل التنفس الظلامي، بزيادة الإجهاد الرطوبي وذلك في كثير من نباتات محاصيل الحقل ومنها الذرة الشامية، وفول الصويا، وزهرة الشمس، (Boyer, 1970). وعلى العكس من ذلك فقد وجد في بعض الأشجار، أنه تحدث زيادة في معدل التنفس الظلامي بزيادة الإجهاد الررطوبي (Brix, 1962).

٣- انتقال المواد الغذائية داخل النبات

إن معدل انتقال نواتج التمثيل الضوئي من الورقة إلى الأجزاء الأخرى بالنبات، يقل تحت الإجهاد الرطوبي. ولقد وجد أن معدل إنتقال المواد الكربوهيدراتية، أثناء النهار من الورقة إلى الأجزاء الأخرى من النبات، قد انخفض، بينما زاد أثناء الليل، وذلك في نباتات الذرة الشامية، وفول الصويا المعرضة للإجهاد الرطوبي. وهنا تجدر الإشارة إلى أن نقص الماء بالورقة يؤدي إلى نقص انتقال مبيدات الحشائش داخل النبات.

عموما- تعتبر عملية انتقال المواد الغذائية بالنبات، أكثر مقاومة لنقص الماء بالورقة عن عملية التمثيل الضوئي في محاصيل الحقل ومن أمثلتها نباتات القطن والذرة الرفيعة. ولقد وجد أن سرعة عملية انتقال المواد الغذائية

بالنبات تظل نشطة إلى أن يصل الجهد المائي بالنبات إلى درجة كافية لتثبيط عملية التمثيل الضوئي، ولكن تقل كمية المواد الغذائية المنتقلة بالنبات تحت مثل هذه الظروف، وقد يرجع ذلك إلى نقص معدل عملية التمثيل الضوئي بسبب الإجهاد الرطوبي.

٤- امتصاص العناصر الغذائية

يؤدي الإجهاد المائي إلى نقص امتصاص النباتات للعناصر الغذائية، وأن أحد العلامات المبكرة لتأثير الإجهاد الرطوبي، هو انتقال النيتروجين والفوسفور من الأوراق المسنة إلى السيقان والأنسجة الميرستيمية.

ويرجع نقص امتصاص العناصر الغذائية بواسطة النباتات المعرضة إلى إجهاد رطوبي إلى: ١- نقص حركة العناصر الغذائية في الأراضي الجافة، ٢- نقص امتداد المجموع الجذري، ٣- نقص نفاذية الجذور للماء والعناصر المعدنية نتيجة لسوبرتها.

لقد وجد فيتس Viets عام ١٩٧٢، أن نقص العناصر المعدنية في التربة لا يكون هو السبب الرئيسي في نقص نمو النباتات المعرضة للإجهاد الرطوبي غالبا، إذ أن معظم النباتات تحتوي على كمية مخزنة من العناصر المعدنية تكفيها أثناء فترة الجفاف المحدود التي تمر بها إذ يقل النمو الخضري أو يتوقف.

تأثير الإجهاد الرطوبي على العمليات البيوكيميائية بالنبات

يؤثر الإجهاد الرطوبي على العمليات البيوكيميائية بالنبات، مثل تمثيل البروتين، وأيض الكربوهيدرات، ومنظمات النمو وغيرها، وسوف نناقش فيما يلي تأثير الإجهاد الرطوبي على هذه العمليات.

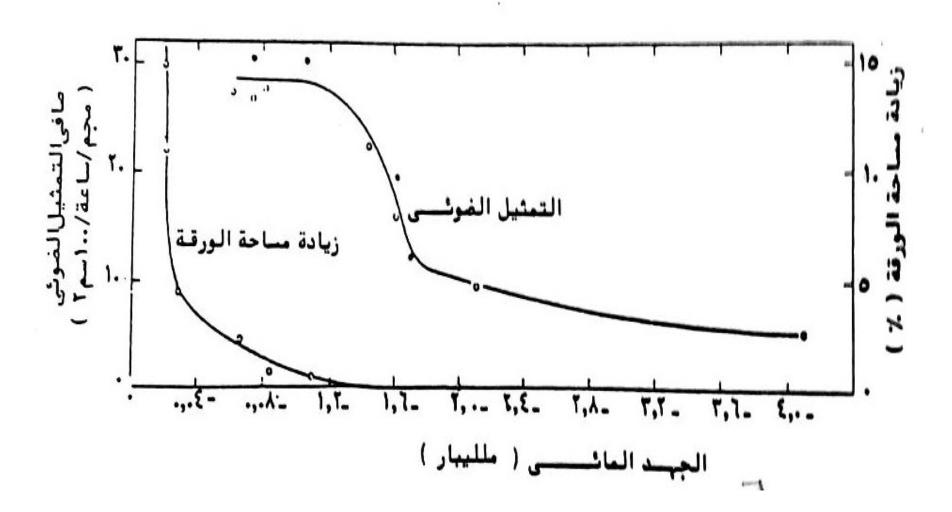
١- تمثيل البروتين

إن النباتات المعرضة للإجهاد الرطوبي يحدث بها عدم انتظام تمثيل البروتين وتحلله، وأن تحلل أو هدم البروتين يسبب ضررا للنباتات المعرضة للجفاف، لأن ذلك يؤدي إلى تجمع بعض النواتج السامة مثل الأمونيا.

يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى زيادة تركيز الأحماض الأمينية الحرة والأميدات بالنبات، ولقد وجد أن تركيز الحمض الأميني البرولين يكون مرتفعا في النباتات المعرضة للإجهاد الرطوبي. ولقد وجد أن أصناف الشعير التي تغل محصولا عاليا تحت ظروف الجفاف، قد أظهرت تركيزا عاليا من

البرولين في طور البادرات أثناء فترة الجفاف، بالمقارنة بمثيلتها الحساسة للجفاف. ولقد اقترح أن الإنتخاب لصفة القدرة العالية على تجميع البرولين بالأنسجة يمكن أن تستخدم كوسيلة في تربية النجيليات للمقاومة للجفاف. ولقد وجد أن تجمع البرولين بخلايا النبات يساعد في مقاومة النبات للظروف البيئية القاسية مثل الجفاف والملوحة ودرجات الحرارة المرتفعة وغيرها، وذلك عن طريق تأثيره على العديد من العوامل الفسيولوجية بالخلية وأهما أنه يعمل على تعديل الإسموزية بالخلية Osmotic adjustment وفي زيادة قدرة النبات على مقاومة تجفيف الخلية Cellular dehydration والذي يتسبب عن الجفاف أو الملوحة أو درجات الحرارة المرتفعة، إذ يعمل تجميع البرولين بالخلية على نقص الجهد المائي للخلية إلى حد أقل من الجهد المائي خارج لخلية وهذا يعمل على انتقال الماء إلى الخلية.

كما وجد أن الإجهاد الرطوبي يؤدي إلى نقص نشاط اختزال النترات وهذا يؤدي إلى نقص الأمونيا، ونقص تكوين الأحماض الأمينية، وبالتالي يقل صافي معدل تكوين البروتين من الأحماض الأمينية بانتظام بتعرض النباتات للإجهاد الرطوبي. وأن تثبيط تخليق البروتين يعتبر أحد العوامل التي تؤدي إلى تجميع البرولين بالأنسجة النباتية المعرضة للإجهاد الرطوبي.



شكل (٩-٦). العلاقة بين الجهد المائي للورقة، وزيادة مساحة السطح الورقي، والتمثيل الضوئي في فول الصويا. يلاحظ أن زيادة مساحة السطح الورقي أكثر حساسية للإجهاد الرطوبي، بالمقارنة بعملية التمثيل الضوئي.

٢- أيض الكربوهيدرات Carbohydrate metabolism

يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى زيادة التحلل المائي للنشا وكذلك نقص تخليقه، ولقد وجد أن سرعة النقص في النشا في أوراق النباتات المعرضة إلى الإجهاد الرطوبي، كانت مصحوبة بزيادة في السكريات الحرة، أساسا السكروز.

٣- منظمات النمو Growth regulations

يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى زيادة سريعة في تركيز حمض الأبسيسك بالأوراق، ولقد وجد أن رش النباتات بواسطة محلول مخفف من حمض الأبسيسك أدى إلى قفل الثغور، من ذلك يستنتج أن الزيادة في حمض الأبسيسك في الأوراق التي تعاني من الإجهاد الرطوبي تسبب قفل الثغور. كما وجد أن حمض الأبسيسك يؤدي إلى زيادة نفاذية الجذور للماء والعناصر الغذائية.

ولقد وجد أن الأوراق التي تعاني من الإجهاد الرطوبي تزداد قدرتها على انتاج الإيثيلين.

حساسية العمليات الفسيولوجية المختلفة للإجهاد الرطوبي

لقد سبق أن ذكرنا أن العمليات الفسيولوجية المختلفة الدائرة بالنبات تتأثر بالإجهاد الرطوبي، إلا أن هذه العمليات المختلفة، تختلف عن بعضها في مدى حساسيتها للإجهاد الرطوبي، ويبين جدول (٩-٤) حساسية العمليات الفسيولوجية المختلفة للإجهاد الرطوبي. ويتضح من الجدول أن نمو الخلية (زيادتها في الحجم) تعتبر أكثر العمليات حساسية للإجهاد الرطوبي، إذ وجد أن زيادة الخلية في الحجم يقل أو يتوقف، قبل الوقت الذي لا يحدث فيه نقصا كبيرا في عملية التمثيل الضوئي، ولذلك فإن الإجهاد الرطوبي يؤدي إلى تكوين نباتات قصيرة متقزمة.

وتعتبر عملية انقسام الخلية أقل حساسية من زيادتها في الحجم، ويعقب عملية نمو الخلية في الحساسية للإجهاد الرطوبي، تمثيل البروتين، ثم قفل الثغور، ثم عملية التمثيل الضوئي، ثم التنفس.

جدول (٩-٤). حساسية بعض العمليات الفسيولوجية بالنبات للإجهاد الرطوبي

العملية	**الجهد المائي للنسيج (بار)**				
	-٥	**-١٠**	**-١٥**	**-٢٠**	
نقص نمو الخلية *	......|	|...			
نقص تمثيل البروتين	....|	|....			
نقص تمثيل الكلوروفيل	..|	|.....			
نقص انزيم Nitrate reductase		|.......|			
تمثيل حمض الأبسيسك		........|	|		
قفل الثغور **		......|	|..		
نقص تمثيل CO_2 **		.....|	|...		
نقص التنفس		....|	....	|..	
تجمع البرولين		...|	....	|..	
تركيز السكر			........|	|..	

الخط المنقط يمثل مجال الجهد المائي، والذي فيه يبدأ تأثير العملية، الخط المتصل يمثل مجال الجهد المائي، والذي فيه تكون العملية متأثرة دائما تقريبا. * أنسجة نامية بسرعة، ** يتوقف على النوع، (Hsaio وآخرون، ١٩٧٦).

تأثير الإجهاد الرطوبي على كمية المحصول

إن تأثير الإجهاد الرطوبي على كمية محصول نباتات محاصيل الحقل المنزرعة، يتوقف على طور النمو الذي يحدث فيه الاجهاد الرطوبي فإذا حدث الإجهاد الرطوبي أثناء فترة النمو الخضري، فيؤدي إلى نقص معدل زيادة مساحة السطح الورقي، مما يؤدي إلى نقص دليل مساحة الأوراق، وقفل الثغور، ونقص معدل التمثيل الضوئي، وهذا يؤدي إلى نقص في المادة الجافة، ونقص كمية المحصول.

وإذا حدث الإجهاد الرطوبي،أثناء فترة الإزهار والإثمار، فإنه يؤثر على محصول البذور، ويتوقف مقدار التأثير على وقت حدوث الإجهاد الرطوبي، ونوع المحصول المنزرع، ففي المحاصيل النجيلية المحدودة النمو، مثل الذرة الشامية، والقمح وغيرها، فإن الإجهاد الرطوبي الشديد أثناء طرد النورات، قد أدت إلى نقص كبير في كمية محصول الحبوب، بالمقارنة بالنباتات التي لم تعرض إلى إجهاد رطوبي، وتعتبر فترة الإزهار والفترة التي تليها بحوالي أسبوعين، هي الفترة الحرجة والأكثر حساسية للإجهاد الرطوبي، ويعتبر عدد الحبوب في النورة هو مكون المحصول، الأكثر تأثيرا بالإجهاد الرطوبي خلال هذه الفترة. أما إذا حدث الإجهاد الرطوبي، بعد ثلاثة أسابيع من الإزهار فإن الإجهاد الرطوبي لم يعد يؤثر على عدد الحبوب بالنورة، ولكن يؤثر على

وزن الحبوب، وذلك لتأثيره على عملية التمثيل الضوئي و/ أو انتقال المواد الممثلة إلى الحبوب.

وهنا تجدر الإشارة إلى أنه إذا حدث الإجهاد الرطوبي بدرجة شديدة نسبيا ولكن لفترة قصيرة أثناء فترة النمو الخضري، فقد لا يتأثر محصول الحبوب في محاصيل الحبوب كما هو الحال في الذرة الشامية، ولكن إذا حدث إجهاد رطوبي بدرجة خفيفة، ولكن لفترة طويلة، فإنه يؤدي إلى نقص كبير في كمية المحصول.

وفي الأنواع النباتية الغير محدودة النمو مثل القطن وفول الصويا،والتي لها القدرة على الإزهار خلال فترة طويلة، تكون أقل حساسية للإجهاد الرطوبي من المحاصيل محدودة النمو، إذ أنه في المحاصيل غير محدودة النمو، يسبب الإجهاد الرطوبي الشديد لفترة قصيرة أثناء الفترات الأولى من مرحلة الإزهار، نقصا طفيفا في محصول البذور كما هو الحال في فول الصويا، حتى ولو أدى الإجهاد الرطوبي إلى سقوط بعض الأزهار،ويرجع ذلك إلى أنه يكون هناك وقتا كافيا لتكوين أزهار أخرى كثيرة على النبات، وذلك بعد زوال فترة الإجهاد الرطوبي.

وعموما- في مثل هذه المحاصيل الغير محدودة النمو مثل فول الصويا فإن مكون المحصول الأكثر تأثيرا بواسطة الإجهاد الرطوبي هو عدد الأزهار لكل نبات، وأن المراحل الأكثر حساسية للإجهاد الرطوبي، هي المرحلة الأخيرة من تكوين القرون، ومنتصف فترة امتلاء البذور، ففي المراحل الأخيرة من تكوين القرون يسبب الإجهاد الرطوبي أيضا سقوط القرون ونقص عدد البذور في القرن، ونقص وزن البذور نتيجة لنقص عملية التمثيل الضوئي، ونقص انتقال المواد الغذائية الممثلة إلى البذور أثناء امتلائها.

ولقد وجد أن الإجهاد الرطوبي، أثناء الإزهار في المناطق التي يزرع بها كل من الذرة الشامية، وفول الصويا، يؤدي عادة إلى نقص أكبر في كمية محصول حبوب الذرة الشامية عنه في فول الصويا.

بعض التأثيرات المفيدة للإجهاد الرطوبي

على الرغم من التأثيرات الضارة للإجهاد الرطوبي على كمية محصول نباتات محاصيل الحقل المنزرعة، إلا أنه توجد بعض التأثيرات المفيدة له على بعض النباتات، وعلى سبيل المثال، وجد أن الإجهاد الرطوبي يؤدي إلى زيادة نسبة الزيت في بذور نباتات فول الصويا، ولكنه يؤدي في نفس الوقت إلى نقص كمية محصول الزيت في وحدة المساحة (Miller and Beard, 1967).

ولقد وجد أن الإجهاد الرطوبي مفيد لبادرات النباتات إذا أجري قبل شتلها، إذ يسبب لها تقسية.

يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى زيادة كمية محصول البذور في البرسيم الحجازي، على الرغم من نقص المحصول الخضري. ولقد وجد أن الإجهاد الرطوبي الخفيف، يوافق انتاج محصول مرتفع من البذور في البرسيم الحجازي (Abu-Shakra وآخرون، ١٩٦٩).

ولقد وجد أن تعريض نباتات قصب السكر وبنجر السكر إلى نقص الرطوبة الأرضية إلى أقل من الحد الأمثل في الفترات الأخيرة من حياة النباتات تؤدي إلى زيادة محصول السكروز في جذور البنجر وسيقان القصب.

قد يؤدي الإجهاد الرطوبي إلى نقص الإصابة بالأمراض والحشرات.

الباب العاشر

التغذية المعدنية

Mineral Nutrition

لقد عرف منذ زمن بعيد أن جذور النباتات النامية في الأرض تحصل على تغذيتها من التربة، وأن إستعمال بعض المواد التي تشجع نمو النباتات معروفة من قديم الزمن، قدم الزراعة نفسها، وأن إستعمال السماد البلدي وبقايا النباتات، وجد أنها تعمل على زيادة إنتاجية هذه المحاصيل، وذلك قبل التوصل إلى معرفة وفهم الإحتياجات الغذائية للنباتات.

لقد بدأعلماء تغذية النباتات، خلال النصف الأول من القرن التاسع عشر، في معرفة أن نمو النباتات يمكن أن يستمر فقط عندما تمد النباتات، بواسطة عناصر معدنية يطلق عليها "العناصر الضرورية Essential elements" ، وتسمى عملية حصول النبات على هذه العناصر المعدنية الضرورية لنموه بـ"التغذية المعدنية".

بعد الانبات وتكشف البادرات فوق سطح التربة، تكون المواد الغذائية المخزنة في الإندوسبرم قد استهلكت، وحينئذ تقوم خلايا الورقة بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيماوية، كما سبق أن ذكرنا، كذلك تقوم خلايا الجذر بامتصاص الماء والعناصر الغذائية الضرورية من التربة، ولذلك فتعتبر العناصر الغذائية من أهم العوامل الخارجية اللازمة لاستمرار النمو والتكشف في نباتات المحاصيل، ويتطلب الحصول على نمو جيد لأي محصول منزرع ضرورة إمداد النبات بجميع العناصر الغذائية الضرورية بكميات كافية ومتوازنة.

وتعتبر نباتات محاصيل الحقل ذاتية التغذية Autotrophic إذ يمكنها أن تكون بنفسها كل المواد التي تحتاجها لنموها وتكشفها إذا مدت بثلاثة عشر عنصرا معدنيا ضروريا، بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون والماء، في وجود الضوء، عن طريق عملية التمثيل الضوئي، وعلى العكس من ذلك، فهناك بعض النباتات الزهرية المتطفلة الخالية من الكلورفيل، مثل الهالوك

والحامول، التي لا تستطيع الاعتماد على نفسها، في بناء غذائها العضوي، بل يلزم الحصول عليه من مصادر خارجية ولذلك فيطلق على مثل هذه النباتات "غير ذاتية التغذية Heterotrophic".

وهنا تجدر الإشارة إلى أن التقدم العلمي في تغذية النبات والتسميد، قد أحدث تغيرا كبيرا في إنتاج المحاصيل، ويرجع جزء منها إلى التسميد بالأسمدة التجارية كما أن إنخفاض كمية محصول المحاصيل المنزرعة في كثير من بلدان العالم، ترجع غالبا إلى نقص العناصر الغذائية اللازمة للنبات.

العناصر الضرورية لتغذية نباتات المحاصيل

لقد تم تحديد ستة عشر عنصرا ضروريا لكل نباتات محاصيل الحقل المنزرعة، ولا يكون النمو والتطور طبيعيا، عند نقص واحد أو أكثر من هذه العناصر ، وتقسم هذه العناصر الضرورية إلى مجموعتين هما:

أولا- العناصر الغذائية الكبرى

العناصر الغذائية الكبرى Macronutrients أو العناصر الكبيرة Major nutrients، وهي العناصر الغذائية التي يحتاجها النبات بكميات كبيرة نسبيا بالمقارنة بالعناصر الغذائية الأخرى، وهذه العناصر هي: الكربون، الهيدروجين، الأكسجين، النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم، الكالسيوم، الماغنسيوم والكبريت.

ثانيا- العناصر الغذائية الصغرى

العناصر الغذائية الصغرى Micronutrients أو العناصر الصغيرة Minor nutrients، أو العناصر الأثرية Trace elements وهي العناصر الغذائية التي يحتاجها النبات بكميات ضئيلة جدا، إذ أن إمداد النبات بكميات زائدة من هذه العناصر يسبب تسممها. وهذه المجموعة تشمل سبعة عناصر هي: الحديد، المنجنيز، الزنك، النحاس، البورون، المولبدينيم والكلور.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن كل العناصر الغذائية الكبرى والصغرى لها نفس الأهمية، ولكن الإختلاف الوحيد، هو مقدار احتياج النبات من هذه العناصر، لإتمام دورة حياته.

الحاجة إلى عناصر غذائية أخرى

بالإضافة إلى العناصر الغذائية السابقة، وجد أن هناك بعض العناصر تعتبر ضرورية لبعض الأنواع النباتية، فقد وجد أن عنصر السيليكون ضروري لنباتات الأرز، وذلك على أساس أن نمو النباتات لم يكن طبيعيا في حالة عدم وجوده في بيئة النمو (Okuda and Takahashi, 1964). كما وجد أيضا أن السيليكون ضروري لنباتات قصب السكر (Elawad وآخرون، عام ١٩٨٢)، بينما لا يعتبر السيليكون ضروريا لنباتات الذرة الشامية ومحاصيل أخرى تابعة للعائلة النجيلية.

وهناك بعض النباتات تحتاج إلى الصوديوم كعنصر من العناصر الغذائية الصغرى (Williams, 1966) ومن أمثلة هذه النباتات، عشب Atriplex vesicera والذي يستخدم كنبات مراعي في بعض دول العالم، وفي نبات القطن وبنجر السكر.

مصادر العناصر الغذائية

يحصل النبات على إحتياجاته من العناصر الغذائية من ثلاثة مصادر هي: التربة والماء والهواء الجوي ويطلق على هذه المصادر الثلاثة بـ"المحيط الحيوي Biosphere".

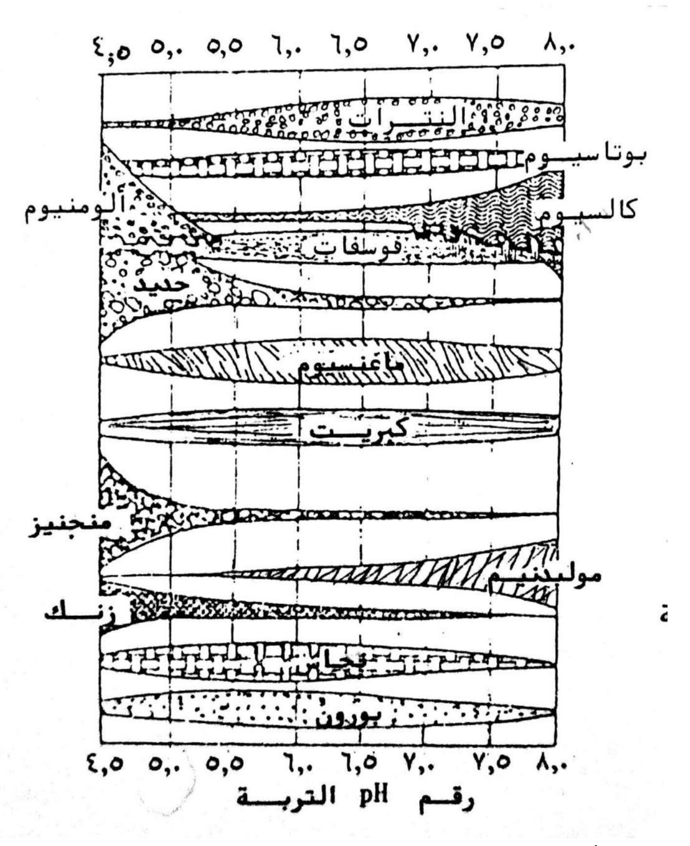
وتحصل النباتات على الكربون والهيدروجين والأكسجين من الهواء الجوي والماء، كما أن النباتات البقولية تستطيع الاستفادة من أزوت الهواء الجوي عن طريق بكتريا العقد الجذرية ذات المعيشة التكافلية معها. أما باقي العناصر فيحصل عليها النبات من التربة، إلا أنها قد تضاف رشا على الأوراق كسماد ورقي.

ويعتبر الهواء الجوي، المصدر الرئيسي للكربون في صورة غاز ثاني أكسيد الكربون. ويحتوي الهواء الجوي على ٠.٠٣% CO_2.

يسر (جاهزية أو صلاحية) العناصر الغذائية للإمتصاص

إن يسرالعناصر الغذائية في التربة، يعتبر أكثر أهمية، من الكمية الكلية المطلقة للعناصر الغذائية بالتربة، في تحديد الحالة الغذائية للنباتات، وحاجتها للتسميد. وهناك عديد من العوامل والتي تؤثر على ذوبان العناصر، وبالتالي يسر العناصر الغذائية للنبات، ويعتبر رقم الـ pH أهم هذه العوامل. ويبين شكل (١٠-١) تأثير رقم الـ pH التربة على يسر العناصر الغذائية المعدنية للإمتصاص بواسطة النباتات. ويتضح من شكل (١٠-١) أنه عند قيم pH

منخفضة (أرض حامضية)، تتجمع كميات سامة من الحديد والمنجنيز والألومنيوم، ولا يكون الفوسفور ميسرا، بسبب تحوله إلى فوسفات غير ذائبة مع الحديد والألومنيوم، ولذلك فإن السمية المتسببة عن الألومنيوم تعتبر من أهم مشاكل الأراضي الحامضية، وعلى العكس من ذلك، فعند pH مرتفع (أرض قلوية)، فإن الفوسفور يتفاعل مع الكالسيوم، ويصبح غير ذائب أو ميسر للنبات. وأن معظم العناصر الغذائية تكون أكثر يسرا وصالحة للإمتصاص بواسطة النباتات عندما يكون رقم pH التربة بين ٦-٧، وأن الكالسيوم والماغنسيوم والبوتاسيوم والمولبدينيم، تكون أكثر يسرا في الأراضي القلوية، بينما تكون عناصر الزنك والمنجنيز والبورون، أقل تيسرا تحت هذه الظروف. وأن الحديد والمنجنيز والألومنيوم، تكون ذائبة بدرجة كبيرة إلى حد السمية في الأراضي شديدة الحموضة (شكل ١٠-١).



شكل (١٠-١). تأثير رقم pH التربة، على يسر العناصر الغذائية المعدنية. الأجزاء العريضة للمساحات المظللة تبين أقصى درجة يسر للعنصر الغذائي.

وهنا تجد الإشارة إلى أن الأنواع النباتية تختلف عن بعضها في رقم pH الموافق لنموها، وإعطائها أعلى محصول. ويبين جدول (١٠-١) تقسيم بعض نباتات محاصيل الحقل طبقا لحساسيتها لرقم الـ pH.

جدول (١٠-١). تقسيم نباتات محاصيل الحقل طبقا لحساسيتها إلى رقم pH التربة.

رقم pH التربة	
٥.٥-٦.٥	**٦.٥-٧.٥**
الشعير	**البرسيم الحجازي**
الفول	**بنجر السكر**
الذرة الشامية	**فول الصويا**
الشوفان	**البرسيم الحلو**
الراي	
الدخان	
القمح	

pH الأراضي الحامضية (في المناطق الرطبة) = ٤-٦، الأراضي المتعادلة =٧، الأراضي القلوية (في المناطق الجافة) = ٨-٩.

مما سبق يتضح أنه في الأراضي الحامضية والأراضي القلوية لا تكون بعض العناصر الغذائية ميسرة للإمتصاص بواسطة النباتات، ولذلك فإنه يفضل إضافتها للنباتات رشا على الأوراق. وأن الطريقة الحديثة لإضافة العناصر الغذائية وخصوصا الصغرى للنباتات تكون في صورة مقيدة (مخلبية) Chelate.

المواد المخلبية، عبارة عن مواد عضوية تحتوي على العنصر الغذائي مثل، الحديد، المنجنيز، الزنك، والنحاس، وأن معظم الكاتيونات متعددة التكافؤ، يمكنها أن تكون مواد مخلبية، ولكنها تختلف من حيث درجة تحررها، والمواد المخلبية فعالة في الأراضي الحامضية لإمداد النباتات بالحديد والزنك وعناصر صغرى أخرى.

وتستعمل المركبات المخلبية بطرق مختلفة، لمعالجة حالة النقص في العناصر الغذائية، وأهم هذه الطرق هي: الرش على النباتات أو إضافتها إلى التربة. والمواد المخلبية، التي تستخدم رشا على النباتات، يجب أن تكون سهلة الإمتصاص بواسطة النباتات، وسهلة الإنتقال، والتحلل داخل النبات، أما إذا

أضيفت إلى التربة، فيجب أن تكون ثابته ضد التحلل المائي، والكائنات الحية الدقيقة، وأن تكون ميسرة للنبات عند الجذور أو داخل النبات، وأن تكون قابلة للذوبان في الماء. وقد يمتص النبات المركب المخلبي كله بما فيه العنصر، أو يمتص العنصر فقط تاركا المركب المخلبي. وهنا تجدر الإشارة إلى أن هناك بعض المواد المخلبية العضوية الطبيعية بالنبات مثل الكلوروفيل، الذي يعتبر mg-chelate.

عموما- تعتبر أسعار هذه المركبات المخلبية عالية، بالمقارنة بالأسمدة الكيماوية الأخرى.

الإحتياجات الكمية من العناصر الغذائية

تتوقف الكمية اللازمة من عنصر غذائي معين على العديد من العوامل أهمها: العنصر الغذائي، المحصول المنزرع، وكمية محصوله، وعلى سبيل المثال، تحتاج معظم نباتات محاصيل الحقل إلى أطنان/ فدان من عنصر الكربون، الهيدروجين والأكسجين، بينما تحتاج إلى بضع عشرات إلى مئات من الكيلوجرامات/ فدان من كل من النيتروجين، الفوسفور، الكبريت، البوتاسيوم والكالسيوم، وتحتاج إلى العناصر المغذية الصغرى، بكميات صغيرة تصل إلى جرامات/ فدان. ونظرا إلى الإحتياجات الضئيلة من العناصر المغذية الصغرى، فإن التسميد بهذه العناصر يكون غير ضروري عادة في معظم الأراضي الزراعية، ولكن يجب التسميدبهذه العناصر في الأراضي العضوية Muck soil والأراضي الملحية.

عموما- لا تمتص نباتات محاصيل الحقل العناصر الغذائية الضرورية بكميات متساوية، كما تختلف كمية العنصر الممتصة بواسطة النبات الواحد باختلاف طور النمو، إذ توجد لكل عنصر غذائي فترة تكون حاجة النبات إليه أكبر ما يمكن، وتكون هذه الفترة في معظم محاصيل الحقل أثناء فترة الإزهار والإثمار، ويطلق على هذه الفترة بـ"الفترة الحرجة لإحتياج المحصول للعنصر". ولقد وجد أن محاصيل الحبوب تمتص عنصر النيتروجين من الأرض بكمية أكبر من أي عنصر غذائي ضروري آخر، بينما تمتص المحاصيل الجذرية البوتاسيوم بكمية أكبر من أي عنصر آخر.

تقدير حاجة الأرض للتسميد

يمكن الحكم على مدى توفر عنصر معين من التربة، وحاجة الأرض للتسميد بهذا العنصر بالطرق الآتية:

١- إختبارات الحقل

تعتبر تجارب التسميد الحقلية من الطرق المفضلة، في تقدير حاجة الأرض للتسميد بعنصر معين، على الرغم من الصعوبات التي تعترض هذه الطريقة، ومن هذه الصعوبات تداخل تأثير بعض العوامل البيئية، مع تأثير العنصر، أو العناصر الختبرة الموجودة بالأرض، ولكن يمكن التغلب على هذه الصعوبات، عن طريق تثبيت جميع العوامل البيئية بقدر المستطاع، عند حدها الأمثل، بحيث يكون المتغير هو تركيز العنصر أو العناصر في الأرض فقط.

وعموما- تعتبر هذه الطريقة مكلفة ومجهدة وتحتاج إلى وقت طويل نسبيا، بالمقارنة بالطرق الأخرى، ولكنها تمتاز بأن إستجابة النبات للتسميد المضاف، تجرى تحت نفس الظروف الطبيعية لنمو نباتات المحصول في الحقل.

٢- تحليل التربة

في هذه الطريقة، يتم تحليل التربة كيماويا قبل الزراعة، أو في أي وقت، أثناء نمو النباتات في الحقل وتقدير الكمية الكلية للعنصر أو العناصر الغذائية، وكذلك الكمية الميسرة منه، والموجودة في التربة، ثم حساب الفرق هذا المقدار المتحصل عليه من التحليل، والمقدار الذي يعطي المحصول الأمثل، وهذا الفرق عبارة عن الكمية من العنصر الواجب إضافتها للوصول إضافتها للمحصول الأمثل. وتعتبر هذه الطريقة أرخص وأسهل في التطبيق عن الطريقة السابقة، ولكن من عيوب هذه الطريقة أنه لا يمكن تقدير الكميات الفعلية للعناصر الغذائية التي يمكن للنباتات إمتصاصها من التربة.

٣- إختبارات الأنسجة

لقد وجد أنه توجد علاقة بين محتوى النبات من العناصر الغذائية، ونموها ومحصولها، إذ وجد أنه كلما زادت نسبة العنصر في التربة النامي فيها النبات، كلما زادت نسبته في النبات، كما وجد أيضا أن الأرض التي تعطي محصولا عاليا من نباتات المحاصيل، تعطي أيضا نباتات تحتوي على نسبة عالية من العناصر الغذائية في أنسجتها.

عموما- يوجد نوعين من اختبارات الأنسجة، تستعمل كدليل على الحالة الغذائية للنبات، وتقدير حاجتها للتسميد هما: التحليل الكيميائي للنسيج النباتي، واختبار العصير.

التحليل الكيميائي للنسيج النباتي: في هذه الطريقة يقدر المحتوى الكلي من العنصر أو العناصر الغذائية موضع الدراسة في العينة النباتية ثم يقارن هذا المحتوى المتحصل عليه، بقيم مثلى ثابته مناسبة قد سبق تحديدها من تجارب حقلية أظهرت فيها النباتات عدم استجابتها للتسميد بهذا العنصر أو العناصر الغذائية، ومن هذه المقارنة يمكن الحكم على نقص أو كفاية العنصر أو العناصر المختبرة في النباتات.

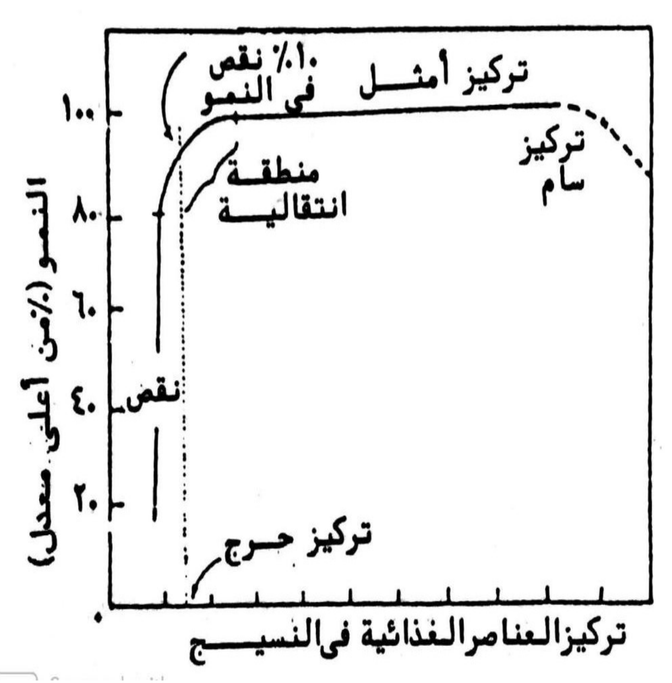
إختبارات العصير: تعتبر هذه الطريقة سريعة، وبها يمكن تحديد كمية العنصر، أو العناصر الغذائية موضع الدراسة والمذابة في العصير. وأن نتائج إختبارات العصير تكون أكثر ثباتا مع الوقت بمقارنتها بمثيلتها المتحصل عليها من طريقة التحليل الكيماوي للأنسجة، ويرجع ذلك إلى أن كميات العناصر الذائبة والمتجمعة في العصير، تكون مرنبطة بمحتوى التربة من الماء.

عموما- في كلتا الطريقتين السابقتين، يجب أن تحدد العينة النباتية، طبقا لنوع المحصول، والجزء من النبات في العينة، وطور النمو، ويجب أن تؤخذ العينات من نباتات نامية تحت الظروف الطبيعية، أي لا تكون النباتات معرضة لظروف نمو قاسية، مثل الجفاف أو المطر الغزير أو الصقيع، لأن تعرض النباتات إلى مثل هذه الظروف وقت أخذ العينات، يؤثر على القيم المتحصل عليها، وأن القيم الناتجة لا تمثل الحقيقة وتكون مضللة، وهذا يؤدي بدوره إلى تقدير خاطئ إلى الاحتياجات السمادية.

عموما- يمكن الإستعانة بالتركيب الكيماوي للأنسجة النباتية للحكم على مدى إحتياج المحصول إلى العنصر الغذائي، ويبن شكل (١٠-٢)، إستجابة النمو وعلاقته بتركيز العناصر الغذائية بالنبات. ويقسم منحنى العلاقة بين نسبة وجود هذه العناصر بالنبات، وإستجابة النبات إلى إضافة هذه العناصر الغذائية، إلى ثلاث مناطق كما يلي:

١- منطقة يكون فيها نقصا للعناصر الغذائية: وأن إضافة العناصر الغذائية في هذه المنطقة، يؤدي إلى زيادة كل من المادة الجافة التي يكونها النبات، والمحصول الإقتصادي.

٢- منطقة إنتقالية: تؤدي إضافة العناصر الغذائية في هذه المنطقة إلى زيادة كلا من تركيز العناصر الغذائية في أنسجة النبات والمحصول.
٣- منطقة يكون فيها تركيز العناصر الغذائية أمثل: تؤدي إصافة العناصر الغذائية في هذه المنطقة إلى زيادة محتوى العناصر في أنسجة النبات، ويقابلها زيادة ضئيلة أو معدومة في االمحصول. ويطلق على هذا الجزء من منحنى الإستجابة بـ"الاستهلاك الزائد Luxury consumption.
٤- منطقة يكون فيها تركيز العناصر سام للنباتات.



شكل (١٠-٢). إستجابة النمو بالنسبة لتركيز العناصر الغذائية في أنسجة النبات. (Epstein, 1972).

إن الهدف من تجارب التسميد، هو معرفة كمية السماد الواجب إضافتها للحصول على أعلى محصول أو ربح، ولتحقيق ذلك، يجب تحديد التركيز الجرج للعناصر الغذائية بأنسجة النبات.

إن التركيز الحرج للعنصر الغذائي بالأنسجة، يعرف بأنه ذلك التركيز الأقل مباشرة من مثيله الذي يعطي نموا أمثل، أو بمعنى آخر هو تركيز العنصر بالنبات الذي يلزم للحصول على ٩٠-٩٥٪ من المحصول الأعلى، أي أن الحد الأدنى لتركيز العنصر بالأنسجة، هو ذلك التركيز الذي يعطي

محصولا قريبا من المحصول الأعلى (Epstein, 1972). ويعتبر التركيز الحرج للعنصر الغذائي بالنسيج، هو أساس طريقة التحليل الكيماوي للنبات، لتحديد حالته الغذائية، والتي يمكن إتخاذها كدليل أو مرشد لتوصيات التسميد. والمثال على ذلك أنه إذا فرض أن التركيز الحرج لعنصر معين، في عضو معين من النبات وليكن الأوراق، يساوي ٥٠٠ جزء في المليون، وأظهرت نتائج التحليل أن تركيز هذا العنصر يصل إلى ٢٠٠ جزء في المليون فقط، فإن هذا يدل على أن النبات يحتاج إلى إضافة هذا العنصر موضع الدراسة حتى يصل إلى التركيز الحرج.

ولقد تم تحديد التركيز الحرج للعناصر الغذائية الضرورية لمحاصيل متعددة. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه عند التطبيق، يجب الأخذ في الإعتبار الظروف البيئية، التي تم فيها الإختبار، وطريقة أخذ العينة.

إن إستجابة المحصول إلى إضافة معظم العناصر الغذائية، يتبع قانون تناقص الغلة Low of diminishing returns، أي تناقص مقدار الزيادة في كمية المحصول، بزيادة كمية العنصر السمادي المضاف، بمعنى أن الزيادة في المحصول لا تكون متناسبة مع الزيادة في العنصر المضاف، إذ تقل الزيادة تدريجيا في المحصول، لكل إضافة جديدة للعنصر المضاف وفي النهاية تتوقف هذه الزيادة.

إمتصاص النبات للعناصر الغذائية

تشمل عملية إمتصاص أيونات العناصر الغذائية بواسطة النبات وانتقالها داخله، مراحل متعددة أهمها: ملامسة الأيون لسطح الجذر ثم إنتقاله من السطح الخارجي للجذر إلى داخله (إمتصاصه)، ثم إنتقال العنصر الغذائي من الجذر إلى المجموع الخضري.

وعموما- توجد طريقتين لامتصاص أيونات العناصر (إنتقال الأيونات من السطح الخارجي للجذر إلى داخل الجذر) هما: ١- إمتصاص سلبي Passive أو غير أيضي Nonmetabolic absorption ٢- إمتصاص إيجابي Active أو أيضي Metabolic absorption .

١- الامتصاص السلبي

يعتبر الإمتصاص السلبي (الغير أيضي)، عملية طبيعية مثل إمتصاص الماء بواسطة قطعة من اُسفنج، وتتحرك الأيونات مع الماء دون الحاجة إلى عمليات أيض. وفي هذه الحالة لا يتدخل الغشاء البلازمي في نقل الأيونات، بل

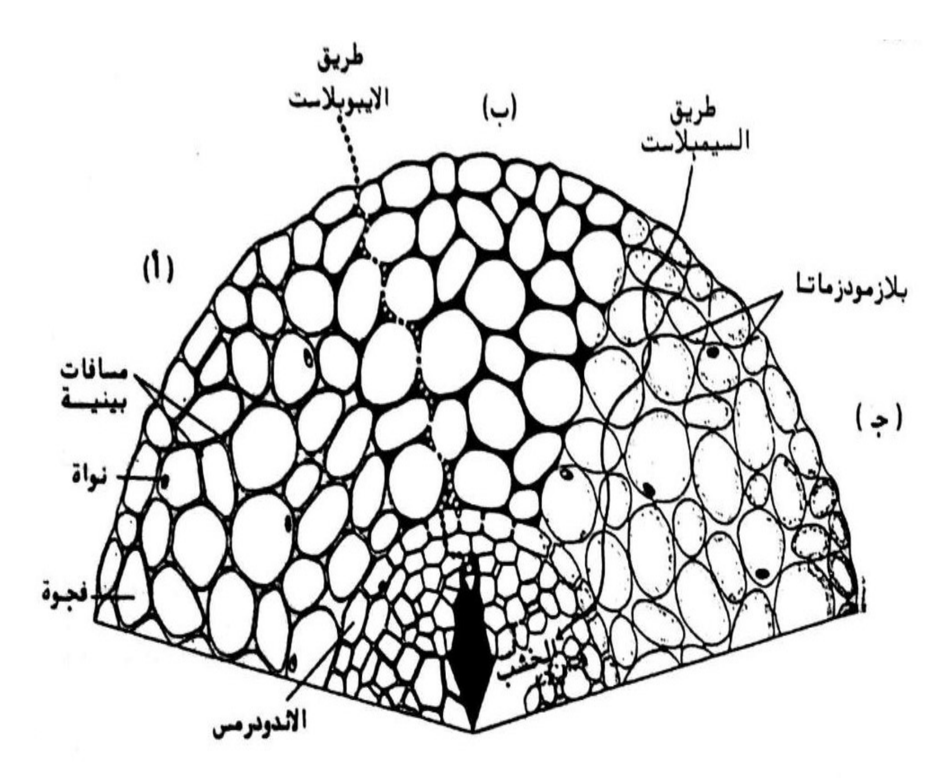
تنتقل خلاله طبيعيا، أي يكون الغشاء البلازمي متخذا موقفا سلبيا في عملية النقل أو الإمتصاص، ولذلك فيطلق على عملية الإمتصاص هذه بـ"الإمتصاص السلبي".

٢- الامتصاص النشط أو الإيجابي أو الحيوي

لقد وجد أن الامتصاص السلبي لا يمكن أن يكون مسؤلا عن التراكم (التجمع) العالي للملح داخل أنسجة النبات، إذ وجد أن أيونات عديدة تستمر في الدخول إلى النسيج النباتي، بمعدل بسيط نسبيا وذلك لفترة طويلة، وذلك بعد فترة إنتهاء فترة الإنتشار الحر، مثل هذه الأيونات تدخل سيتوبلازم الخلايا، وتتراكم في الفجوة، ولا تستطيع الانتقال منها إلى المحلول الخارجي ثانية. إن هذا التراكم المستمر والبطئ للأيونات ضد منحدر التركيز، يحتاج إلى طاقة أيضيةMetabolic energy ، إذ وجد أنه عندما يثبط النشاط الأيضي للنسيج ينخفض أيضا معدل الإمتصاص. ويطلق على هذه الطريقة لامتصاص الأيون بالامتصاص النشط أو الحيوي أو الإيجابي، لأن الخلايا يجب أن تبذل شغلا لنقل الأيون من المحلول الخارجي إلى الفجوة. وتوجد أدلة عديدة، على أن الطاقة اللازمة لذلك مصدرها التنفس (أي تستخدم طاقة ATP). ووجد في هذا المجال أيضا أن معدل التنفس، ومعدل إمتصاص الأيونات ينخفضان بنقص الأكسجين في المحلول، كما وجد أن هناك إرتباطا موجبا بين معدل التنفس، ومعدل إمتصاص العنصر، أي أنه كلما زاد معدل التنفس كلما زاد معدل تراكم أيونات العناصر المعدنية بالنسيج النباتي. ولقد أمكن إثبات أن إمتصاص الأيونات يعتمد على التنفس، عن طريق تثبيط التنفس بواسطة بعض المواد السامة مثل السيانيد، وهذا أدى بدوره إلى تثبيط إمتصاص الأيونات.

جـ- انتقال العناصر المعدنية من الجذر إلى المجموع الخضري

لكل تنتقل العناصر الغذائية المعدنية من الجذر إلى المجموع الخضري، فإن أيونات العناصر الممتصة بواسطة الجذر من المحلول الأرضي يجب أن تعبر القشرة Cortex، ثم تدخل خلايا الخشب في الجذر. وأن آلية انتقال الأملاح في الخشب، تشبه تقريبا آلية الإنتقال النشط في الخلايا الفردية لتجميع الأيونات في داخل فجواتها ، والدليل على ذلك أنه تحت ظروف معينة، يكون تركيز العناصر المعدنية داخل الخشب، أكبر بعدة مرات عن مثيله في المحلول الأرضي، كما أن تراكم العناصر المعدنية في الخشب يثبط أيضا عند نقص معدل التنفس، أو عن طريق حرمان الجذور من الأكسجين.



شكل (١٠-٣). قطاع عرضي في جذر، يظهر فيه طرق إنتقال الماء والعناصر الغذائية عبر القشرة. أ) جزء من القطاع العرضي للجذر، ب) جزء مشابه تظهر فيه الجدر الخلوية والمسافات البينية (الإيبوبلاست) والمظللة باللون الأسود، لاحظ توقف استمرارية انتقال الماء والعناصر الغذائية في الإيبوبلاست، بسبب شريط كاسبار على خلايا الإندودرمس، جـ) جزء من القطاع العرضي للجذر مشابه للجزئين السابقين، يين الخلايا الحية، والخيوط السيتوبلازمية (النظام الحر – السيمبلاست) والتي تظهر منقطة.

من ذلك يتضح أن امتصاص العناصر الغذائية وانتقالها بواسطة جذور النباتات، يتم عن طريق كلا من الامتصاص السلبي والامتصاص النشط، ويتم الامتصاص السلبي عن طريق ما يسمى بالنظام الميت Apoplastic system، والذي يمثل المناطق في الجذر التي تشغل بواسطة الفراغات الحرة Free spaces (الأجزاء الغير حية) كما هو مبين بشكل (١٠-٣)، وهذه تشتمل على المسافات البينية، والفجوات المملوءة بالماء لعناصر الخشب الميتة، والجدر الخلوية. وفي هذا النظام يحدث الانتشار الحر للماء والأيونات المذابة فيه حتى تصل إلى طبقة الاندودرمس.

ويتم الامتصاص الحي أو النشط عن طريق ما يسمى بالنظام الحي Symplastic system والذي يمثل الحجم أو الجزء من الجذر الذي يشغل

بواسطة بروتوبلاست الخلايا الحية، وتشمل الأجزاء السيتوبلازمية الفجوات، ونظرا إلى أن هذه الأجزاء السيتوبلازمية والفجوات تكون مرتبطة ببعضها بواسطة الخيوط السيتوبلازمية Plasmodermsmata والتي تعبر من خلية إلى أخرى (شكل ١٠-٣)، ولذلك فإن سيتوبلازم جميع خلايا القشرة، يرتبط مع بعضه البعض عن طريقالبلازمودزماتا، وهذه تعتبر ممرا لانتقال العناصر المعدنية خلال بروتوبلاست الخلايا المختلفة.

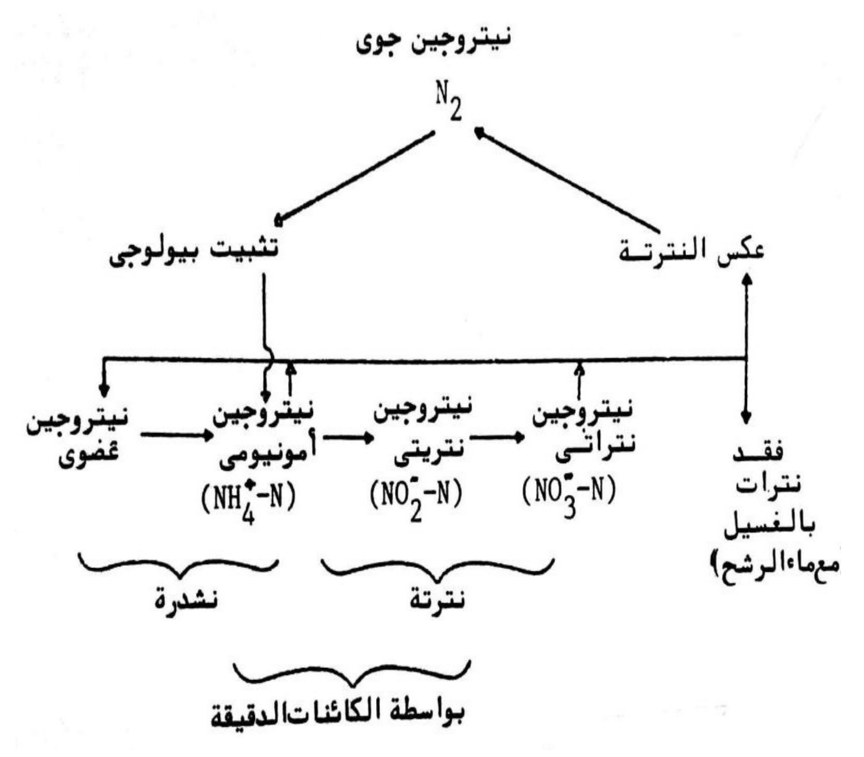
أهمية العناصر الغذائية للنباتات

النيتروجين Nitrogen

يعتبر النيتروجين من العناصر الغذائية الهامة في تغذية نباتات المحاصيل وتحتاجه النباتات بكميات كبيرة، ويكون النيتروجين ٧٩% من الغلاف الجوي الغازي للأرض في صورة نيتروجين جزيئي (N_2)، كما توجد نسبة كبيرة من النيتروجين في القشرة الأرضية والصخور والرسوبيات، ولكن لا تستطيع نباتات المحاصيل الاستفادة من النيتروجين الجزيئي بطريقة مباشرة في نموها.

إن الصورة المؤكسدة من النيتروجين وهي النترات (NO_3^-) أو المختزلة وهي الأمونيوم (NH_4^+) هما الميسرتان للامتصاص بواسطة نباتات المحاصيل تحت ظروف الحقل.

وفي التربة تتحول الأمونيوم إلى نترات بواسطة بكتريا النترتة كما هو مبين بشكل (١٠-٤). وتعتبر عملية النترتة Nitrification أكسدة بيولوجية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة للأمونيوم إلى نترات.



شكل (١٠-٤). تحولات النيتروجين في التربة.

ويحدث فقد لنيتروجين التربة على الصورة الغازية، نتيجة لحدوث عملية عكس النترتة (التأزت) Denitrification، وهذه العملية عبارة عن عملية اختزال بيولوجي للنترات والنتريت إلى غازات متطايرة وتقوم بهذه العملية الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة تحت الظروف اللاهوائية، لأن هذه الكائنات تستعمل النترات والنتريت كمصدر للأكسجين اللازم لها، وبالتالي فتتحول النترات والنتريت إلى أكسيد النيتروز (NO_2) أو غاز النيتروجين (N_2).

ويزداد معدل عملية عكس النترتة تحت ظروف درجات الحرارة المرتفعة نسبيا، وتوافر الظروف التي تساعد على الاختزال وهي نقص الأكسجين وذلك في الأراضي الغدقة سيئة الصرف Waterlogging كما تحدث في الأراضي المغمورة بالماء، أو المنزرعة بمحصول الأرز، ولذلك فينصح بإضافة السماد النشادري للأرض المنزرعة بمحصول الأرز على عمق حوالي ١٠سم من سطح التربة، لأنه إذا أضيف هذا السماد سطحيا على عمق ١سم من سطح

التربة، تحدث أكسدة الأمونيوم إلى نتريت ونترات، وهذه تتحرك إلى أسفل في طبقة الإختزال بعيدا عن سطح التربة.

ومن الجدير بالذكر، أن نيتروجين التربة على صورة أمونيوم أقل تعرضا لعمليات الفقد مع ماء الرشح أو الصرف عن النترات، وذلك لأن أيون الأمونيوم يدمص على سطح حبيبات التربة، على عكس النترات التي توجد حرة في محلول التربة ولذلك فتكون معرضة للفقد بواسطة عمليات الغسيل والرشح لأنها لا تدمص على سطح حبيبات التربة.

ولحماية فقد النترات من التربة نتيجة لعملية الغسيل أو الرشح، أو عن طريق تحول النترات إلى غازات تفقد من التربة بواسطة عملية عكس النترتة، فقد تم التوصل خلال السنوات الأخيرة، إلى إضافة مواد كيماوية مانعة أو مثبطة لعملية النترتة، ومن هذه المثبطات التي تستعمل على نطاق تجاري في كثير من دول العالم هو مركب: النيترابيرين (N-serve أو Nitrapyrin). وهو مركب عضوي يعمل على المحافظة على إبقاء النيتروجين في صورة أمونيوم في التربة وذلك عن طريق إيقاف عملية أكسدة الأمونيوم إلى نتريت بيولوجيا عن طريق بكتريا من نوع Nitrosomonas وهذه لا تؤثر تأثيرا ضارا على الكائنات الحية الدقيقة الأخرى. ولقد أدى إستعمال مادة النيترابيرين إلى زيادة محصول الذرة الشامية زيادة معنوية.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن اليوريا ظهرت كسماد نيتروجيني واسع الانتشار نظرا لانخفاض تكاليف إنتاجها نسبيا. وعندما تضاف اليوريا إلى التربة تنحل بواسطة إنزيم اليورييز Urease إلى كربونات أمونيوم، وهذه سهلة الانحلال إذ تتحول في الأرض إلى نتريت ثم نترات.

وإن تمثيل النيتروجين إلى مركبات عضوية بالنبات يعتمد على اختزال النترات بواسطة إنزيم (نيترات ردكتيز Nitrate reductase) في أنسجة النبات. ولقد وجد أن درجة الحرارة وشدة الإضاءة المناسبة تعتبر ضرورية لنشاط هذا الإنزيم.

ويدخل النيتروجين في تركيب كثير من المركبات النباتية وأهمها الأحماض الأمينية، والتي تعتبر الوحدات الرئيسية لبناء البروتين، كما يدخل في تركيب الإنزيمات، والأحماض النووية، وفي تركيب الكلوروفيل، ولذلك فهو أساسي في عملية التمثيل الضوئي.

ونظرا لدخول النيتروجين في مركبات عديدة بالنبات، فإنه من الصعب هنا ذكر جميع هذه المركبات، ولكن عموما، يعتبر النيتروجين أساسي في

تركيب المواد الحية بالنبات، ولذلك فهو أساسي في بناء الخلية، والنشاط الميرستيمي، وفي عمليات النمو الخضري والثمري.

إن نقص النيتروجين يؤدي إلى تقزم النباتات واصفرار الأوراق، ويرجع ذلك أساسا إلى نقص انقسام واستطالة الخلايا ونقص الكلوروفيل، وتظهر أعراض نقص النيتروجين (اصفرار الأوراق) على الأوراق المسنة أولا، ثم يمتد بعد ذلك إلى الأوراق العليا حديثة العمر، ويرجع ذلك إلى أن النيتروجين سريع الحركة داخل النبات، إذ ينتقل من الأوراق والأجزاء المسنة بالنبات إلى الأوراق والأجزاء النباتية الأخرى حديثة التكوين، والتي تمثل مصبات هامة.

وأن إعادة إنتقال أو توزيع النيتروجين بالنبات وخصوصا عندما يكون امتصاصه محدودا يؤدي إلى اصفرار وجفاف الأوراق السفلى على النبات.

الفوسفورPhosphorus

يلعب الفوسفور دورا هاما في العمليات الحيوية بالنبات، مثل التمثيل الضوئي والتنفس وغيرها، ويعتبر الفوسفور مكونا رئيسيا في تركيب كثير من المركبات الحيوية الهامة مثل: المركبات الغنية بالطاقة وهي (ADP and Adenosine di- and triphosphoate (ATP و NADP و NADP و Desoxyribo- and ribonucleic acid و (DNA and RNA) وغيرها.

كما يدخل الفوسفور في تكوين الفوسفوليبيدات وأهمها الليسيثين Lecithin والتي تلعب دورا هاما في تكوين الأغشية الخلوية.

إن الفوسفور الموجود في التربة يقسم إلى ثلاثة أقسام من حيث جاهزيته وتيسره للنبات كما يلي:

١- الفوسفور الموجود في المحلول الأرضي، وهو الفوسفور الذائب وتكون كميته في المحلول الأرضي ضئيلة جدا، إذ أنه نادرا ما تتعدى ١٠ جزء في المليون، ومن الجدير بالذكر، أن المحافظة على تركيز الفوسفور الذائب في محلول التربة، ذو أهمية كبيرة لنمو النبات، وتتم المحافظة عليه عادة عن طريق تعويض ما يفقد منه عن طريق الإمتصاص بواسطة النبات. ويوجد الفوسفور في محلول التربة أساسا على صورة أيونات فوسفات أحادية ($H_2PO_4^-$) وفوسفات ثنائية (HPO_4^{-2}) وفوسفات ثلاثية (PO_4^{-3}). وأن سيادة أحد هذه الصور في محلول التربة على الصور الأخرى يعتمد على pH محلول التربة، ففي الأراضي الحامضية (pH أقل من ٧) تسود الفوسفات الأحادية، بينما تسود الفوسفات الثنائية في الأراضي القلوية (pH أعلى من ٧.٢)، وعند

pH يساوي ٧ فإن هاتين الصورتين توجدان بكميات متساوية تقريبا (شكل ١٠-٥).

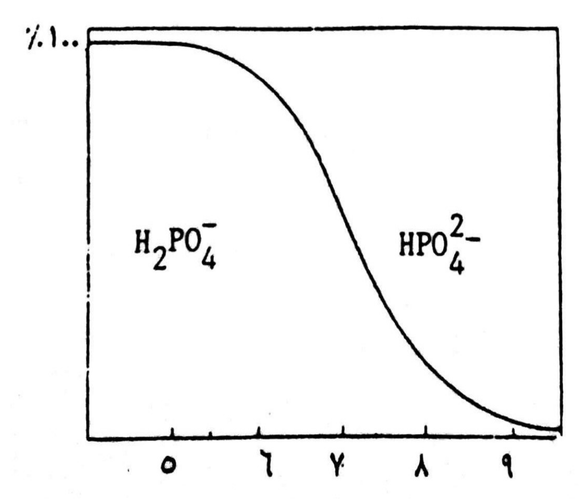
ومن الجدير بالذكر، أن هذه الصور لا تكون حرة في محلول التربة في الأراضي الحامضية أو القلوية، بل تتفاعل مع أيونات الحديد والألومنيوم في الأراضي الحامضية، ومع الكالسيوم والماغنسيوم في الأراضي القلوية وتكون مركبات غير ذائبة وغير ميسرة للإمتصاص بواسطة النبات.

٢- الفوسفور المدمص على سطوح حبيبات التربة، ويكون في حالة توازن مع فوسفور محلول التربة، ولذلك فيعتبر مخزنا للفوسفور في محلول التربة.

٣- الفوسفور الغير ذائب (الغير ميسر للنبات)، وهذا الفوسفور يتحول ببطئ عند تحوله إلى فوسفور مدمص على أسطح حبيبات التربة. ومصادر الفوسفور الغير ذائب هو معدن الأباتيت، وفوسفات الحديد والكالسيوم والماغنسيوم، وكذلك الفوسفور العضوي بالتربة.

وحيث أن كمية الفوسفور الذائب في محلول التربة ضئيلة جدا كما سبق أن ذكرنا بالمقارنة بالصورة المتبادلة، يعتبر الفوسفور أكثر العناصر المحددة لنمو النباتات وذلك بعد النيتروجين.

وتمتص نباتات المحاصيل الفوسفور، تحت ظروف الحقل، في صورة أيونات فوسفات أحادية، وبكمية أقل في صورة أيونات فوسفات ثنائية والذي يكون أكثر سيادة عند رقم pH التعادل أو أكثر (شكل ١٠-٥).



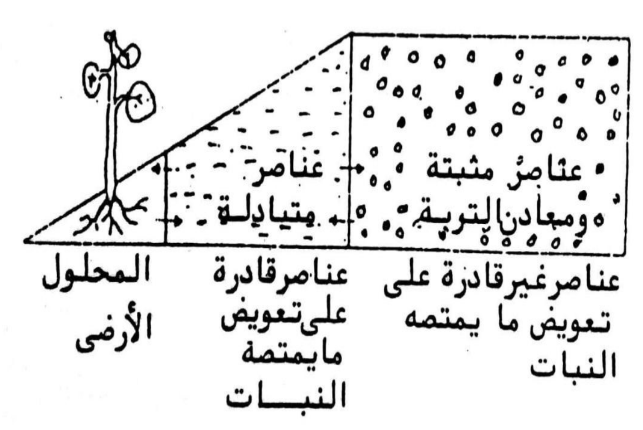
شكل (١٠-٥). علاقة pH بيئة النمو بميسورية الفوسفات الأحادية $H_2PO_4^-$ والثنائية HPO_4^{-2}.

ومن الجدير بالذكر، أن إضافة المادة العضوية للتربة تعمل على زيادة تيسر الفوسفور للنباتات، وذلك نتيجة لتأثير غاز CO_2 الناتج من تحللها على زيادة ذوبان الفوسفات الغير ذائبة، كما أن الأحماض العضوية الناتجة من تحلل المادة العضوية تتحد مع الحديد والألومونيوم مكونة مركبات معقدة تعمل على عدم إحتجازها للفوسفور.

بوجه عام، يتضح من شكل (١٠-٥) أن pH التربة بين ٥.٥-٧ هو أفضل pH لتيسر فوسفور التربة للنبات، ويقل تيسره بانخفاض أو إرتفاع pH التربة عن هذا الحد.

إن النباتات التي تعاني من نقص الفوسفور تكون ذات أوراق خضراء داكنة، كما يكون حجم الأوراق أقل من الحجم الطبيعي. كما تكون النباتات متقزمة. ويؤدي نقص الفوسفور إلى نقص عدد وطول الجذور. وتظهر صبغة الأنثوسيانين عند قواعد السيقان والعروق في النباتات التي تعاني من نقص الفوسفور، كما هو الحال في الذرة الشامية.

وكما هو الحال في النيتروجين، تظهر أعراض نقص الفوسفور على الأوراق المسنة أولا، بسبب إعادة توزيع وانتقال الفوسفور إلى الأنسجة الحديثة.



شكل (١٠-٦). رسم توضيحي يبين يسر عناصر التربة للنبات.

البوتاسيوم Potassium

إن المصدر الرئيسي للبوتاسيوم اللازم للنبات هو البوتاسيوم الناتج من تأثير عمليات التجوية على المعادن الأولية والثانوية مثل الفلسبار والطين، ولذلك فإن الأراضي الغنية في محتواها من الطين تكون ذات محتوى عال من البوتاسيوم، وعلى العكس من ذلك، فإن الأراضي الرملية تكون منخفضة في محتواها من البوتاسيوم.

ويضاف إلى هذه المصادر الأسمدة الكيميائية التي تضاف إلى التربة، وكذلك المخلفات النباتية، ويمتص النبات البوتاسيوم في صورة كاتيون (K^+).

إن البوتاسيوم يوجد في التربة على ثلاث صور هي:

١- بوتاسيوم مثبت في المعادن الأولية والثانوية للتربة، ويطلق على هذه الصورة مخزن البوتاسيوم الأرضي.

٢- بوتاسيوم متبادل Exchangeable (مدمص) على سطوح حبيبات التربة، ويعتبر المصدر الرئيسي للجزء القابل لإفادة النبات، ومصدره المعادن المحتوية عليه أو من السماد أو من المخلفات النباتية. ويمثل البوتاسيوم المتبادل حوالي ١-٣% فقط من الكمية الكلية للبوتاسيوم في التربة.

٣- بوتاسيوم ذائب في المحلول الأرضي.

البوتاسيوم الذائب في المحلول الأرضي يوجد بنسبة أقل من البوتاسيوم المتبادل (حوالي ١-٥% من المتبادل).

ويوجد البوتاسيوم الذائب والمتبادل في الأرض في حالة اتزان مع بعضهما. وأن امتصاص البوتاسيوم بواسطة النبات يكون أساسا من البوتاسيوم الذائب في محلول التربة، ويصحب النقص في البوتاسيوم الذائب عن طريق الامتصاص، انطلاق البوتاسيوم من الصورة المتبادلة إلى الصورة الذائبة، والتي بالتالي سوف تسبب الانطلاق البطئ للبوتاسيوم المثبت، كما أن جزءا من البوتاسيوم الذي يضاف إلى الأرض على صورة سماد يتحول إلى الصورة المتبادلة والمثبتة. ويمكن تمثيل حالة الاتزان بين الصورة الذائبة والمتبادلة والمثبتة كما يلي:

بوتاسيوم ذائب ⇌ بوتاسيوم متبادل ⇌ بوتاسيوم مثبت

من هذا يتضح أن كلا من البوتاسيوم الذائب والمتبادل والمثبت يساهم بقدر كبير أو صغير في إمداد النبات بحاجته من هذا العنصر.

وعلى الرغم من أن البوتاسيوم ضروري لكل النباتات، إلا أنه لا يدخل في تركيب أي مكون من مكونات النبات، ولكنه يقوم بالوظائف الآتية:

١- يعمل البوتاسيوم أساسا كمنشط إنزيمي أو كعامل منشط لحوال ٤٦ إنزيما بالنبات.

٢- يعمل البوتاسيوم على المحافظة على الجهد الإسموزي للخلايا وامتصاص الماء، إذ يوجد البوتاسيوم في الخلايا في صورة أملاح عضوية أو غير عضوية سهلة الذوبان، فيؤدي ذلك إلى رفع الضغط الإسموزي للعصير الخلوي، ولذلك فقد وجد أن النباتات التي تمد بكمية كبيرة من البوتاسيوم تفقد كمية أقل من الماء. كما وجد أن للبوتاسيوم تأثيرا موجبا على قفل الثغور.

٣- يؤثر البوتاسيوم على امتصاص وانتقال الأيونات، ووجد أنه يشجع انتقال النترات بالنبات.

٤- يعمل البوتاسيوم على نقص الإصابة ببعض الأمراض في كثير من النباتات، إذ يؤدي إلى نقص مرض الذبول في القطن كما يقلل من رقاد النباتات.

٥- يقوم البوتاسيوم بدور حيوي في التمثيل الضوئي بطريق مباشر عن طريق زيادة النمو ودليل مساحة الأوراق، وبالتالي زيادة تمثيل غاز CO_2، كما يعمل على زيادة معدل نقل نواتج التمثيل الضوئي من الورقة إلى أعضاء النبات الأخرى، ويرجع ذلك إلى تأثير البوتاسيوم على زيادة ATP المتكون واللازم لتحميل (شحن) اللحاء بنواتج التمثيل الضوئي من الورقة إلى أعضاء أخرى.

إن الحد الحرج من البوتاسيوم في أنسجة النبات يكون مرتفعا نسبيا ويكون عادة ١%، أي أربعة أضعاف مثيله في الفوسفور. ويمتص النبات كل كمية البوتاسيوم اللازمة له أثناء فترة النمو الخضري تقريبا، وينتقل جزءا ضئيلا من البوتاسيوم الممتص إلى الثمار او الحبوب. ولقد وجد أن إضافة البوتاسيوم إلى القمح أثناء مرحلة النمو الثمري ذو تأثير قليل على محصول الحبوب.

وتختلف النباتات المختلفة عن بعضها من حيث إحتياجاتها واستجابتها للأسمدة البوتاسية، وبوجه عام، فقد وجد أن محصول بنجر السكر والقصب والبطاطس، تحتاج إلى البوتاسيوم بكميات أعلى نسبيا مما تحتاجه محاصيل أخرى مثل القطن.

وحيث أن البوتاسيوم ينتقل من الأجزاء المسنة على النبات إلى الأجزاء الحديثة، فإن أعراض نقصه تظهر أولا على الأوراق المسنة. ويؤدي نقص البوتاسيوم في البداية، إلى نقص معدل نمو النبات، ثم اصفرار النبات. ويسبب النقص الشديد للبوتاسيوم إلى ظهور بقع (مساحات) محروقة للأنسجة النباتية بين العروق، وموت أو إحتراق قمم وحواف الأوراق المسنة لأنواع نباتية كثيرة.

ويؤدي نقص البوتاسيوم أيضا إلى زيادة الرقاد في بعض نباتات المحاصيل، مثل الذرة الشامية، كما يسبب أيضا نقص عدد الجذور الدعامية، والإصابة بمرض تعفن الساق بها.

كما يؤدي النقص الشديد للبوتاسيوم أيضا إلى تقزم النباتات وقصر سلامياتها.

الكالسيوم Calcium

تمتص النباتات الكالسيوم من محلول التربة في صورة كاتيون Ca^{+2} ويعتبر الكالسيوم من العناصر الغذائية الغير متحركة داخل النبات.

يدخل الكالسيوم في تركيب جدار الخلية، حيث تتكون الصفيحة الوسطية التي تعمل على إلتحام الخلايا بعضها ببعض من بكتات الكالسيوم والماغنسيوم.

يعتبر الكالسيوم ضروريا لاستطالة وانقسام الخلايا، ولكل نشاط ميرستيمي، ولذلك فإن نقصه يسبب تشوه تكوين الميرستيمات، خصوصا القمم النامية للجذور والسيقان، وقد يرجع ذلك إلى نقص انتقاله عن طريق اللحاء وعدم انتقاله داخل النبات من الأجزاء النباتية المسنة إلى الأنسجة الميرستيمية والأجزاء النباتية حديثة التكوين.

ويعتبر الكالسيوم عنصرا ضروريا لقيام الأغشية الخلوية بوظيفتها في التحكم في اختيارية نفاذية الغشاء للذائبات، ولذا فإن نقص الكالسيوم يؤدي إلى تحطم تركيب الأغشية وانتشار المركبات العضوية والغير عضوية إلى خارج الخلية.

ويعمل الكالسيوم على التخلص من الأحماض العضوية الضارة الناتجة من عمليات الهدم المختلفة بالنبات، إذ تتحد هذه الأحماض مثل الأكساليك والفورميك مع الكالسيوم مكونة أملاحا غير ذائبة.

ويؤثر الكالسيوم في تيسر عناصر غذائية أخرى، كما يؤثر على نمو الكائنات الحية بالتربة، وخصوصا البكتريا.

تختلف المحاصيل المختلفة في احتياجها للكالسيوم. ولقد وجد أن معظم المحاصيل البقولية التي تزرع في المناطق المعتدلة، تحتاج إلى كميات كبيرة نسبيا من الكالسيوم وpH مرتفع، لأن تكوين العقد الجذرية وتثبيت النيتروجين الجوي بواسطة النباتات البقولية يحتاج إلى كمية مناسبة من الكالسيوم. كما تحتاج المحاصيل الدرنية مثل البطاطس والجذرية مثل بنجر السكر إلى كميات عالية نسبيا من الكالسيوم.

إن نباتات الفول السوداني تحتاج إلى كميات كبيرة نسبيا من الكالسيوم في منطقة حامل الثمرة، لكي تتكون الثمرة طبيعيا، والذي يمتص مباشرة بواسطة حامل الثمرة أو الثمرة، إذ يعتقد أن كمية الكالسيوم التي تصل إلى منطقة حامل الثمرة والثمرة الموجودة أسفل سطح الأرض قليلة جدا وغير كافية. ولقد وجد أن إضافة الجبس بمعدل ٧٥٠كجم/ هكتار (٣١٢.٥كجم/ فدان)، أثناء تكوين الثمار في الفول السوداني يعمل على زيادة المحصول وتحسين صفاته.

تظهر أعراض نقص الكالسيوم على أجزاء النبات الحديثة التكوين، إذ تكون الأوراق غير طبيعية (مشوهة) وصفراء، ولكن من النادر أن تظهر أعراض النقص على الأجزاء النباتية المسنة، ويرجع ذلك إلى عدم إنتقاله من الأجزاء النباتية المسنة إلى الأجزاء الحديثة التكوين.

كما يؤدي النقص الشديد للكالسيوم إلى موت القمم النامية للساق والجذور. ويسبب نقص الكالسيوم أثناء نمو الثمار (القرون) إلى ظهور مرض القلب البني Brown heart في الفول السوداني.

الماغنسيوم Magnesium

إن نسبة الماغنسيوم في التربة تزداد بزيادة نسبة الطين والمادة العضوية. وأن أراضي المناطق الرطبة والتي تكون غالبا حامضية تعاني من نقص الماغنسيوم بسبب عمليات فقده من التربة بواسطة عملية الغسيل بواسطة الأمطار، ويحل الألومونيوم محل الماغنسيوم على سطوح حبيبات الطين، وعلى العكس من ذلك في أراضي المناطق الجافة.

وكما هو الحال في الكاتيونات الأخرى، فإن الماغنسيوم يوجد في التربة في صورة ذائبة في المحلول الأرضي، وهو الميسر للإمتصاص بواسطة النباتات، كما يوجد متبادل على أسطح حبيبات التربة، ويعتبر مخزنا لماغنسيوم محلول التربة، كما يوجد في صورة مثبته في المعادن الأولية والثانوية، ويكون الماغنسيوم المتبادل حوالي ٥% من الماغنسيوم الكلي بينما يكون الماغنسيوم الذائب أقل من هذه الكمية بكثير.

وعادة يكون الماغنسيوم حوالي ٤-٢٠% من السعة التبادلية الكاتيونية، بينما يكون الكالسيوم أكثر من ٨٠% والبوتاسيوم ٥%.

إن امتصاص الماغنسيوم يكون نشطا وسلبيا، وانتقاله يكون أساسا عن طريق تيار النتح مثل الكالسيوم، كما أن الكمية التي يمتصها النبات من الماغنسيوم أقل من مثيلتها للكالسيوم أو البوتاسيوم بوجه عام. وأن متحتوى النبات عموما من الماغنسيوم يتراوح بين ٠.٢٥-٠.٥% من وزن المادة الجافة.

يتأثر امتصاص النبات للماغنسيوم بتركيز الكاتيونات الأخرى في محلول التربة. وعلى سبيل المثال، يؤدي زيادة تركيز البوتاسيوم والكالسيوم في محلول التربة إلى نقص امتصاص الماغنسيوم نتيجة لعملية التضاد Antagonism والتزاحم على جهات الامتصاص، ولذلك ففي الأراضي الرملية ذات السعة التبادلية الكاتيونية المنخفضة تتعرض إلى مشكلة التضاد بين البوتاسيوم والماغنسيوم، عندما يوجد البوتاسيوم بتركيزات عالية.

يدخل الماغنسيوم في تركيب جزئ الكلوروفيل، إذ أن كل جزئ كلوروفيل يحتوي على ذرة واحدة من الماغنسيوم، أي أن الماغنسيوم يكون ٢,٧% من وزن الكلوروفيل، وهذا يؤكد أهمية الماغنسيوم في عملية التمثيل الضوئي، كما وجد أن نقص الماغنسيوم يسبب نقصا في عدد وحجم الجرانا بالبلاستيدات الخضراء.

يعمل الماغنسيوم على تنشيط العديد من الإنزيمات المصاحبة لأيض المواد الكربوهيدراتية. وقد يوجد الماغنسيوم مرتبطا مع ADP و ATP والأحماض العضوية، ولذلك فإنه ضروري لمئات من التفاعلات الإنزيمية بالنبات.

وحيث أن الماغنسيوم ضروري لنشاط إنزيم RUBP carboxylase فإنه يعتبر عاملا محددا في عملية التمثيل الضوئي، وتمثيل النيتروجين وتكوين البروتين. كما أن الماغنسيوم ضروري أيضا في عملية تكوين الدهون، حيث أن البذور الغنية بالزيت هي غنية أيضا بالماغنسيوم.

يظهر نقص الماغنسيوم عادة في البداية على الأوراق المسنة في صورة اصفرار بين العروق، وباستمرار النقص يمتد الاصفرار حتى يشمل الأوراق الحديثة، ويرجع ذلك إلى أن الماغنسيوم متحركا داخل النبات ولكن ببطئ. ويبدأ الاصفرار أولا على حواف وقمم الأوراق، ثم يمتد إلى الداخل وتبقى

العروق خضراء، وفي حالة النقص الشديد تتكون مساحات نخرية Necrosis بالورقة ويتأخر الإزهار والإثمار.

ويعالج نقص الماغنسيوم بإضافة أسمدة تحتوي على الماغنسيوم مثل كبريتات الماغنسيوم في الأراضي المتعادلة، أما في الأراضي الحامضية فيفضل إضافة الدولوميت.

الكبريت Sulfur

إن مصدر الكبريت بالتربة هو المادة العضوية والأملاح الغير عضوية مثل كبريتات الكالسيوم وكبريتات الماغنسيوم، ولذلك فإن كمية الكبريت بالتربة تتناسب طرديا مع كمية المادة العضوية بها، ويحتوي الغلاف الجوي على كبريت غازي في صورة ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) ، والذي يعود إلى الأرض مذابا في مياه الأمطار. ومن الجدير بالذكر أن الغلاف الجوي للمناطق البعيدة عن المدن الصناعية والبحر مثل بعض المناطق في أفريقيا وأمريكا وأستراليا وغيرها، يحتوي على كمية قليلة من الكبريت. وعموما- يمكن للنبات الإستفادة من ثاني أكسيد الكبريت الجوي بالإنتشار الغازي عن طريق الثغور. وبذلك فيمكن القول بأن النباتات تحصل على الكبريت من التربة، ومن مياه الأمطار ومياه الري والأسمدة والمبيدات الحشرية والفطرية ومن الجو.

ويوجد الكبريت المعدني في التربة في ثلاث صور هي: الكبريت المذاب في محلول التربة، والكبريت المدمص على سطوح حبيبات التربة والكبريت المثبت في الجزء الصلب من التربة، وهذه الصور الثلاث من الكبريت تكون في حالة اتزان مع بعضها كما سبق أن ذكرنا.

وتمتص النباتات الكبريت أساسا في صورة أيونات كبريتات (SO_4^{-2})، كما يمكن للأوراق امتصاص كميات محسوسة من SO_2 من الجو.

وكما هو الحال في النيتروجين، فإن كل الصور المؤكسدة من الكبريت يجب إختزالها بواسطة الإنزيمات أولا داخل النبات، قبل أن تمثل بالنبات إلى كبريت عضوي.

وتتراح نسبة الكبريت بالنبات بين ٠.٠٥ إلى ٠.٢٥% من الوزن الجاف الكلي.

يدخل الكبريت في تركيب بعض الأحماض الأمينية مثل السيستين والميثونين والتي تتكون منها البروتينات.

ويدخل الكبريت في تركيب مرافق الإنزيم أ (Coenzyme A) وبعض الفيتامينات، كما ينشط عدد من الإنزيمات التي تقوم بأدوار هامة في أيض الخلية.

ويساعد في تثبيت النيتروجين بواسطة النباتات البقولية إذ يدخل في تركيب إنزيم النيتروجنيز.

وتحتوي النباتات التابعة للعائلة الصليبية والتي يتبعها محصول الخردل والسلجم (من محاصيل الزيت) على أكثر من ١% كبريت، كما أن النباتات البقولية تحتوي على نسبة عالية أيضا من الكبريت.

وأن زيت بعض النباتات، وخصوصا الزيت الناتج من نباتات العائلة الصليبية يكون غنيا بالكبريت.

ولقد وجد أن إحتياجات نباتات العائلة الزنبقية من الكبريت عالية نسبيا، إذ وجد أن محصول من ١٥ طن بصل يحتاج إلى ١٠ كجم كبريت. أما محاصيل الحبوب الصغيرة والحشائش والذرة الشامية فتحتاج إلى كميات قليلة نسبيا.

ولقد وجد أن التسميد بالكبريت يؤدي إلى زيادة محتوى البذور من الزيت في بعض المحاصيل مثل الكتان وفول الصويا.

يؤدي نقص الكبريت إلى تقزم النباتات واصفرارها والسيقان تكون رفيعة وصلبة وقابلة للكسر.

وحيث أن الكبريت عنصر متحرك بالنبات، فإنه ينتقل من الأجزاء النباتية المسنة إلى أخرى حديثة السن، ولذلك فإن أعراض نقصه تظهر أولا على الأوراق المسنة ولكنها تظهر متأخرة بعكس النيتروجين، وذلك لأن حركة النيتروجين داخل النبات أسرع من الكبريت.

ولمعالجة نقص الكبريت تضاف المواد التي تحتوي على الكبريت، مثل سماد الكبريت (S)، والجبس، وكبريتات الأمونيوم، وكبريتات البوتاسيوم وغيرها.

الحديد Iron

إن الحديد الذائب في محلول التربة الناتج من عمليات التجوية للمعادن الأولية والثانوية قليل جدا مقارنة بالحديد الكلي بالتربة، ويرجع ذلك إلى أن معظم مركبات الحديد السائدة في التربة غير قابلة للذوبان في الماء.

ومن الجدير بالذكر، أن كل الأراضي تحتوي على كميات كبيرة نسبيا من الحديد، ولكن النقص يكون في الصورة المذابة والمتبادلة للحديد، ولذلك فقد

يظهر نقص الحديد على الأنواع النباتية وخصوصا تلك الغير فعالة في امتصاص الحديد من التربة.

وتتوقف درجة ذوبان الحديد بالتربة على رقم pH التربة (شكل ١٠-١)، ولقد وجد أن درجة ذوبان الحديد بالتربة تقل حوالي ١٠٠ مرة عند تغيير pH التربة بمقدار وحدة واحدة. ففي الأراضي ذات pH المرتفع يقل نشاط أيون الحديديك Fe^{+3} في المحلول الأرضي، إذ يتفاعل مع (OH) مما يؤدي إلى ترسيبه على شكل هيدروكسيد حديديك ($Fe(OH)_3$) ولذلك فتحتوي الأراضي القلوية على مستويات عالية من الحديد الغير ذائب في صورة هيدروكسيد حديديك، أما الأراضي الحامضية فتحتوي على تركيزات عالية من الحديد الذائب في صورة Fe^{3+} كما يلي:

أرض حامضية أرض قلوية

أيون حديديك Fe^{+3} ⟵ هيدروكسيد حديديك $Fe_2(OH)_3$

صلب ومترسب

أما في الأراضي الرديئة الصرف (الغدقة)، يحدث إختزال للحديد من Fe^{+3} إلى Fe^{+2} ، مما يؤدي إلى زيادة الحديد المتيسر والذي قد يصل إلى درجة السمية لبعض الأنواع النباتية، وتحدث عملية الإختزال هذه في الأراضي المنزرعة أرز والمغمورة بالماء.

وتمتص النباتات الحديد أساسا في صورة أيون حديدوز Fe^{+2} . ويتأثر امتصاص الحديد بوجود الكاتيونات الأخرى في المحلول الأرضي.

يدخل الحديد في تركيب السيتوكروم والفريدوكسين، كما يشارك في تنشيط العديد من الإنزيمات منها انزيم اختزال النترات والنيتروجينيز، ولذلك فإنه يدخل في عملية تثبيت النيتروجين. وعلى الرغم من أن الحديد لا يدخل في تركيب الكلوروفيل إلا أنه ضروري لتكوينه.

إن الأنواع النباتية المختلفة تختلف في قدرتها على امتصاص الحديد من التربة. ولقد وجد أن الأنواع النباتية والأصناف التي تفرز أيونات (OH^-) بكثرة بواسطة جذورها، تكون غير فعالة في امتصاص الحديد، كما هو الحال في محاصيل الحبوب مثل القمح والنباتات العشبية، وعلى العكس من ذلك فإن نباتات الطماطم التي تتميز بكفاءتها العالية في امتصاص الحديد من التربة التي تعاني نقصا شديدا في الحديد، فإنها تقلل من رقم pH بيئة الجذورعن طريق افراز مواد عضوية مختزلة، مثل Caffiec acid، مما يسبب ذوبان الحديد، كما تفرز جذور نباتات عباد الشمس مادة Riboflavin المختزلة.

وأن عنصر الحديد لا يتحرك داخل النبات من الأجزاء النباتية المسنة إلى تلك الحديثة، لذلك تظهر أعراض نقصه أولا على الأجزاء والنموات الحديثة. وتظهر الأعراض على صورة اصفرار الأوراق، ثم يتحول لونها إلى لون أبيض عاجي.

ومن الجدير بالذكر، أن إضافة الحديد الغير عضوي للتربة يكون قليل أو عديم الفائدة كعلاج لنقص الحديد، إلا إذا استعمل بمعدلات عالية، أن مثل هذه المركبات تتحول بسرعة إلى صورة غير متيسرة في التربة. ولذلك فينصح باستعمال كبريتات الحديدوز ($FeSO_4$) رشا على الأوراق (بتركيز ٤-٦%).

كما ينصح باستعمال الحديد المخلبي Fe-chelated كمصلح للتربة أو رشا على النباتات. وأن Fe-EDHA يعتبر أكثر فعالية من Fe-EDTA في الأراضي الجيرية.

المنجنيز Manganese

يوجد المنجنيز في الأراضي في صورة أيون ثنائي التكافؤ Mn^{2+} في المحلول الأرضي، أو في صورة متبادلة على سطوح معادن الطين والمادة العضوية. كما يوجد المنجنيز في صورة أكاسيد المنجنيز التي تحتوي على المنجنيز في صورته الثلاثية والرباعية التكافؤ (Mn^{4+} و Mn^{3+}). وأن Mn^{2+} الموجود في محلول التربة يكون في حالة اتزان مع Mn^{2+} ، المتبادل على سطوح حبيبات الطين والمادة العضوية.

,تسود أيونات المنجنيز الثنائية عند pH منخفض، وفي الظروف المختزلة (في الأراضي الغدقة)، لذلك فإن غمر الأرض بالماء كما هو الحال في الأراضي المنزرعة بالأرز أو في بعض الأراضي ذات pH منخفض يمكن أن ينتج بها Mn^{+2} ذائب، بتركيزات عالية قد تصل إلى حد السمية للنباتات، وعلى العكس من ذلك، فتحت ظروف التهوية الجيدة تحدث أكسدة Mn^{2+} إلى Mn^{3+} و Mn^{4+} الغير ميسرة للامتصاص بواسطة النبات.

ويعتبر المنجنيز منشطا لعدد من الإنزيمات، وخصوصا التي تعمل في تمثيل الأحماض الدهنية والنيوكليوتيدات، كما أنه ضروري لعمليتي التنفس والتمثيل الضوئي. كما ينشط إنزيم Indoleacetic acid (IAA) Oxidase ولذلك يؤدي وجود المنجنيز بتركيزات عالية في الأنسجة إلى نقص IAA وعلى العكس، فقد وجد أن نقصه يؤدي إلى زيادة غير طبيعية في IAA في نباتات القطن.

وأن المنجنيز لا يكون سهل الحركة داخل النبات، ولذلك فإن أعراض نقصه تظهر أولا على الأوراق حديثة التكوين على شكل بقع رمادية محترقة.
ويمكن معالجة نقص المنجنيز عن طريق رش النباتات بواسطة كبريتات المنجنيز $MnSO_4$ أو المنجنيز المخلبي Mn-EDDTA.
كما أن إضافة المنجنيز إلى التربة في صورة $MnSO_4$ تعتبر طريقة فعالة أيضا في معالجة نقص المنجنيز.

الزنك Zink

إن محتوى التربة من الزنك يرتبط موجبا بمحتوى التربة من المادة العضوية، ويرتبط سالبا بزيادة pH. ويتفاعل الزنك مع المادة العضوية بالتربة، لتكوين مركب زنك عضوي، وأن ٦٠% من هذه الصورة المقيدة تكون ذائبة، وتكون مصدرا للزنك في الأراضي، ولذلك فالأراضي الرملية تكون فقيرة في الزنك.
كما أن ميسورية الزنك للنباتات ترتبط ارتباطا سالبا بكمية الفوسفور الذائب، لترسيب الزنك على صورة فوسفات زنك أقل ميسورية للنبات. ولقد وجد أن نباتات الذرة الشامية التي سمدت بحوالي ٣٠٠كجم فوسفور/ هكتار، قد نقص محتواها من الزنك بنسبة ٣٠-٥٠%.
تمتص النباتات الزنك في صورة أيونات ثنائي التكافؤ Zn^{+2}، وقد يمتص في صورة $ZnCl^{+}$ أو $ZnOH^{+}$ وأن امتصاص الحديد والمنجنيز يتضادان مع امتصاص الزنك.
إن الزنك ضروري للإنزيمات التي تعمل في تخليق التربتوفان (المادة التي تسبق تكوين إندول حمض الخليك IAA)، ولذلك فقد وجد أن النباتات التي ينقصها الزنك يكون محتواها من التربتوفان منخفض وتكون ذات أوراق صغيرة وتسقط مبكرا.
ويعتبر الزنك بطئ الحركة داخل النبات، ولذلك فتظهر أعراض نقصه في البداية على الأجزاء الحديثة على النبات، ويسبب نقص الزنك في البداية تكوين أوراق صغية الحجم. ويسبب النقص الحاد اصفرار الأوراق بين العروق، ونقص معدل نمو الورقة ثم موتها في النهاية.

البورون Boron

يوجد البورون في المحلول الأرضي في صورة ذائبة بتركيزات منخفضة جدا لحمض البوريك (H_3BO_3) أو على شكل بورات Borate (HBO_3) ويوجد البورون مدمصا على سطوح الطين والمادة العضوية في صورة بورات، وأن ادمصاص البورات يقل بارتفاع pH التربة، ولذلك فإن الأراضي الرملية الفقيرة في المادة العضوية تكون فقيرة عادة في البورون وكذلك الأراضي القلوية التي تحتوي على كربونات كالسيوم.

وإن البورون يسهل عملية انتقال السكريات في النبات، حيث يتفاعل مع السكريات مكونا معقد بوراتي (سكر وبورون) B-Polysaccharide وهذا المعقد تكون حركته خلال الأغشية الخلوية Free space أسهل من حركة جزيئات السكر منفردة.

ويعتقد أن البورون يؤثر في تكوين خلايا النبات عن طريق تأثيره على انتقال السكر. كما أن البورون هام في تكوين الأحماض النووية.

ويقوم البورون بتنظيم النشاط الإنزيمي بالنبات، كما يقوم بتنظيم تكوين ونشاط الهرمونات النباتية، حيث أن نقص البورون يؤدي إلى نقص تكوين السيتوكينينات وزيادة تجميع الأكسين بكميات كبيرة قد تؤدي إلى الموت الموضعي للأنسجة النباتية. كما أن البورون ضروري لتكوين جدار الخلية.

ويسبب نقص البورون بعض الأمراض الفسيولوجية في بعض المحاصيل، مثل مرض عفن القلب Heart rot في بنجر السكر.

ولقد وجد أن نباتات الذرة الشامية التي ينقصها البورون تكون ذات نورات مذكرة تحتوي على حبوب لقاح غير حية، كما أن الحريرة تكون غير قادرة على استقبال حبوب لقاح من نباتات مسمدة جيدا بالبورون بينما لا يؤثر البورون تأثيرا واضحا على النمو الخضري للذرة الشامية في مجال واسع من التركيز (Vaughan, 1977).

ويؤدي نقص البورون إلى تجمع النترات بالنبات وقلة تكوين البروتينات، بسبب انخفاض معدل اختزال النترات وتكوين الأحماض الأمينية.

وتختلف النباتات المختلفة في احتياجها لعنصر البورون، ويعتبر بنجر السكر من النباتات الحساسة لنقص البورون، بينما تعتبر محاصيل الحبوب وفول الصويا حساسة لزيادته.

والجدير بالذكر، أن زيادة البورون عن حاجة النبات تسبب أضرارا له كما أن المقادير اللازمة لبعض الأنواع النباتية قد تكون ضارة لأخرى.

وحيث أن البورون لا يتحرك غالبا داخل النبات، فإن أعراض نقصه تظهر أولا على الأجزاء العليا من النبات والحديثة النمو، وتظهر أعراض النقص على صورة نمو غير طبيعي، وفي الغالب تكون الأوراق حديثة التكوين سميكة ملتوية ومشوهة ومنكمشة وذات لون أخضر مزرق. وفي حالة النقص الشديد تكون السيقان ضعيفة وقابلة للكسر، وموت قمم السيقان والجذور، واعاقة تكوين الأزهار والثمار أو عدم تكوينها.

النحاس Copper

يلعب النحاس دورا في التمثيل الضوئي، إذ يدخل في تركيب البلاستوسيانين Plastocyanine الأساسية كحاملة الكترونات بين النظام الضوئي الأول والثاني. كما يدخل النحاس في تركيب بعض الإنزيمات مثل أكسيديز حمض الأسكوربيك Polyphenol oxidase و Ascorbic acid oxidase.

إن محاصيل الحبوب أكثر حساسية لنقص النحاس، حيث تصبح حواف الأوراق ذات لون أبيض، وقد لا تتكون النورات أو الحبوب.

وتختلف الأنواع النباتية في درجة مقاومتها لنقص النحاس، ويعتبر فول الصويا من المحاصيل المقاومة لنقص النحاس.

ويمكن معالجة نقص النحاس عن طريق إضافة مركبات النحاس المخلبية مثل Cu-DTPA.

الموليبدنيم Molybdenum

ويساعدالمولبيدنيم في نشاط إنزيمي Nitrite and nitrate Reductase.

وتظهر أعراض نقص الموليبدنيم في صورة اصفرار الأوراق بين العروق، ويمكن معالجة النقص عن طريق إضافة الجير إلى إلى التربة، أو بواسطة إضافة Na_2MoO_4. ولقد وجد أن إضافة المولبيدنيم رشا على النباتات أكثر فعالية من إضافته للتربة.

الكلورين Chlorine

يعتبر الكلورين أكثر الأيونات شيوعا، وتحصل النباتات على قدر كاف من الكلورين من الغلاف الجوي. وفي التربة يدمص الكلورين بواسطة غرويات التربة كأنيون Cl^-. ويتنافس امتصاص الكلورين مع امتصاص النترات No_3^- ولا يتحرك الكلورين في النبات، ويتجمع في الأجزاء المسنة من النبات.

ولا يدخل الكلورين في تركيب أي مادة نباتية، ولكن يعتقد أنه لازم للتمثيل الضوئي. ولقد وجد أن الكلورين يؤدي إلى نقص الرقاد.

وحيث أن النباتات تحصل على كميات مناسبة من الكلورين من الهواء والأمطار ومن مخلفات الحيوان، فغالبا لا تظهر أعراض نقصه على معظم النباتات. وتظهر أعراض نقص الكلورين في بادئ الأمر في صورة ذبول الأوراق ثم اصفرار لونها.

الباب الحادي عشر

الإزهار والإثمار

Flowering and Fruiting

إن تحول النبات من النمو الخضري إلى النمو الثمري، يمثل تغيرا كبيرا في دورة حياته. وفي النباتات الحولية ومعظم نباتات محاصيل الحقل المنزرعة، يبدأ النمو الثمري، باستبداء تكوين الأزهار وينتهي بإنتاج البذور أو الثمار، وفي النباتات النجيلية، يعتبر إستبداء تكوين الأزهار نهاية تكوين أوراقا جديدة، وفي بعض النباتات يبدأ النمو الثمري قبل نهاية النمو الخضري أي أن النبات ينمو خضريا وثمريا في نفس الوقت كما هو الحال في القطن.

إن تكوين وإنتاج البذور، يعتبر الهدف الرئيسي غالبا في إنتاج معظم محاصيل الحقل. وإن تكوين الأزهار والبذور والثمار، يمر بعديد من المراحل والعمليات والتغيرات المورفولوجية والفسيولوجية والتشريحية وغيرها، ولكن على الرغم من ذلك فإنه يمكن تمييز مرحلتين رئيسيتين فقط بالعين المجردة، وهما تكوين الأزهار، وتكوين البذور أو الثمار. وأن كل مرحلة من هذه المراحل تكون نهاية لعديد من العمليات والتغيرات الأخرى.

وسوف نتناول فيما يلي بعض العمليات الهامة التي يتضمنها النمو الثمري، والتي تهم كلا من منتج ومربي المحاصيل، وهذه العمليات هي:

أولا- تهيئة (حث) النباتات للإزهار

ثانيا- إستبداء تكوين مبادئ (أصول) الأزهار.

ثالثا- نمو وتكشف الأصول الزهرية.

أولا- تهيئة (حث) النباتات للإزهار Floral induction

لقد نال موضوع تهيئة (حث) النباتات للإزهار إهتمام العديد من الباحثين. ويتضمن تهيئة النباتات للإزهار ما يلي:

١- وصول النباتات إلى مرحلة النضج أو البلوغ للإزهار،

٢- الإستجابة للظروف البيئية المهيئة للإزهار، وأهمها طول الفترة الضوئية، ودرجة الحرارة،

٣- تكوين منبه (مشجع) الأزهار أو هرمون الإزهار، ثم إنتقاله إلى المناطق الميرستيمية القمية من النمو الخضري مثل قمة الساق والأفرع. وسوف نتناول هذه المراحل بشئ من الإيجاز.

١- النضج (البلوغ) للإزهار

قبل أن يصبح النبات مهيأ للإزهار وإستبداء تكوين أصول الأزهار، فلابد أن يتم فترة أو طور معين من النمو الخضري، ولقد اطلق على مرحلة النمو الخضري الأولى هذه بـ"مرحلة النضج للإزهار Ripeness to flower stage أو مرحلة النمو الأساسية Basic Vegetative Period – BVD".

وأن مرحلة النضج (البلوغ) للإزهار هذه لا تميز بأي صفة من الصفات الخارجية. ويعبر عن مرحلة النضج للإزهار أو BVD عادة بعدد الأوراق التي تتكون على النبات، وقد يعبر أيضا بعمر النبات، وكلاهما يختلف بإختلاف الأنواع النباتية والأصناف. وعلى سبيل المثال، لا تتهيأ نباتات الراي، وبعض النباتات النجيلية الأخرى للإزهار إلا إذا تكون على النباتات سبعة أوراق على الأقل، كما أن بعض أصناف الذرة الشامية لا تتهيأ للإزهار إلا إذا تكون على النباتات حوالي ١١ ورقة.

وأن أقل عمر لنباتات فول الصويا حتى تصل إلى مرحلة النضج للإزهار هو ستة أسابيع. وعموما- معظم النباتات الحولية المنزرعة، تصل إلى مرحلة النضج للإزهار بعد ٢-٣ أسبوع بعد تكشف البادرات، وتكوين بضع أوراق على النبات، بينما تصل بعض الأشجار إلى مرحلة النضج للإزهار بعد خمسة سنوات أو أكثر.

إن أقل عدد من الأوراق على النبات، والذي عنده يصبح ناضجا للإزهار يتأثر بالظروف البيئية في بعض النباتات، إذ وجد أن نقص العناصر المعدنية في بيئة نمو النبات بمقدار ورقة واحدة أو ورقتين عند مرحلة النضج للإزهار بالمقارنة بالنباتات التي لا تعاني من نقص العناصر المعدنية (Holdwoth, 1956).

٢- إستجابة النباتات لطول الفترة الضوئية المهيئة للإزهار

إن وصول النباتات إلى مرحلة النضج (البلوغ) للإزهار ليس من الضروري أن يؤدي بطبيعة الحال إلى تكوين مبادئ للأزهار في كثير من النباتات، ولكن يجب توافر عوامل بيئية معينة، حتى تتحول النباتات من مرحلة النمو الخضري إلى الثمري. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه إذا توافرت هذه الظروف البيئية نفسها إلى نفس النباتات التي لم تصل إلى مرحلة النضج للإزهار.

عموما- تختلف مواعيد إزهار نباتات المحاصيل المختلفة خلال العام فبعضها يزهر في الربيع، وبعضها يزهر في منتصف الصيف أو في آخره، وبعضها يزهر أثناء الشتاء. ويرجع هذا الإختلاف في مواعيد التزهير في المحاصيل المختلفة إلى إختلاف الإحتياجات البيئية اللازمة لتحويل المنطقة الميرستيمية القمية من النمو الخضري إلى النمو الثمري.

ويعتبر الضوء، ودرجة الحرارة، من أهم العوامل البيئية التي تتحكم في إزهار معظم نباتات محاصيل الحقل. وأن إستجابة الإزهار والإثمار لهذه العوامل البيئية، قد نالت إهتمام كثير من الباحثين منذ أكثر من خمسين عاما مضت. وسوف نناقش فيما يلي إستجابة نباتات المحاصيل لكل من الضوء والحرارة لكي تزهر.

لقد أكدت دراسات عديدة أن طول النهار (طول الفترة الضوئية) تعتبر أهم عامل بيئي يتحكم في إزهار نباتات محاصيل الحقل، إذ وجد أن طفرة في نبات الدخان أطلق عليها ماريلاند ماموث Maryland Mammoth لا تزهر في الحقل في أشهر الصيف (نهار طويل) أي ظلت النباتات في حالة خضرية، بينما أزهرت نباتات الدخان العادية Nicotiana tabacum ولكن عندما نقلت نباتات هذه الطفرة إلى الصوبة، في الشتاء (نهار قصير) فقد أزهرت في منتصف شهر ديسمبر. ولتأكيد هذه المشاهدات فقد زرعت هذه الطفرة تحت ظروف الصوبة الزجاجية، وتعريضها لنهار قصير خلال أشهر الصيف، فقد وجد أن النباتات قد أزهرت تحت هذه الظروف من طول النهار، وعلى العكس من ذلك فقد ظلت النباتات في حالة خضرية خلال أشهر الشتاء، وذلك بإطالة طول النهار عن طريق الإضاءة الصناعية (Gardner, et.al., 1985).

ومن الجدير بالذكر أنه عند خط الإستواء، يتساوى طول كل من النهار والليل تقريبا (١٢ ساعة) وذلك على مدار السنة، ولذلك فمعظم نباتات المنطقة الإستوائية تنتمي إلى مجموعة نباتات النهار القصير، وتزهر باستمرار بشرط

توافر الرطوبة ودرجة الحرارة المناسبة- وعند الإنتقال شمال خط الإستواء، فإن إزهار النباتات يكون موسميا، ويحدث في وقت معين من السنة.

كما لوحظ، أن إزهار نباتات فول الصويا صنف بيلوكسي Biloxi soybean يتم غالبا في شهر سبتمبر، سواء زرع في شهر مايو أو يونيو أو يوليو أو أغسطس، ولقد استنتجا أن طول النهار يعتبر أهم عامل بيئي يتحكم في إزهار نباتات الدخان، وفول الصويا، وأن هذه النباتات أزهرت إستجابة لطول نهار أقل من طول نهار حرج معين Critical day length أي أنها من نباتات النهار القصير.

ويطلق على إستجابة النباتات لطول الفترة الضوئية التي تتعرض لها لكي تزهر بـ"التواقت الضوئي Photoperiodsm"، ويبين شكل (١١-١)، نباتات الدخان التي ظهرت فيها ظاهرة التواقت الضوئي.

ولقد وجد أن هناك بعض الأنواع النباتية لا تكون حساسة لطول النهار، ولذلك فإنها لا تحتاج إلى طول نهار معين حتى تزهر، بينما تزهر خلال مجال واسع من طول النهار.



شكل (١١-١). نباتات الدخان (ماريلاند ماموث) التي أكتشف فيها لأول مرة ظاهرة التواقت الضوئي. على اليمين نبات نامي تحت ظروف نهار طويل في صوبة مضاءة كهربيا (لم يزهر)، وعلى اليسار نبات نامي تحت ظروف نهار قصير في صوبة غير مضاءة كهربيا (النبات أزهر).

تقسيم نباتات المحاصيل على حسب إستجابتها لطول الفترة الضوئية حتى تزهر

تختلف نباتات المحاصيل المختلفة إختلافا كبيرا في إستجابتها لطول الفترة الضوئية حتى تزهر. وبوجه عام، تقسم نباتات المحاصيل على حسب إستجابتها لطول الفترة الضوئية لكي تزهر إلى خمسة أقسام هي:

١- نباتات نهار قصير Short-day plants

هي النباتات التي تزهر إذا تعرضت إلى طول نهار أقل من طول نهار حرج معين، ويختلف طول النهار الحرج باختلاف الأنواع النباتية والأصناف. ومن أمثلة نباتات هذه المجموعة، نباتات الدخان (ماريلاند ماموث) وفول الصويا صنف بيلوكسي، والذرة الشامية، والذرة الرفيعة، وكثير من النباتات التي نشأت في المناطق الإستوائية.

وهنا تجدر الإشارة إلى أن طول النهار الحرج في نباتات فول الصويا صنف بيلوكسي هو ١٢ ساعة، هذا يعني أن هذه النباتات يسرع إزهارها عن طريق تعريضها إلى طول نهار أقل من ١٢ ساعة، ولا تزهر إذا تعرضت لطول نهار أطول من ١٢ ساعة، وتستمر في نموها الخضري.

٢- نباتات نهار طويل Long-day plants

هي النباتات التي تزهر إذا تعرضت لطول نهار أطول من طول نهار حرج معين. ويختلف طول النهار الحرج باختلاف الأنواع النباتية والأصناف. ومن أمثلة نباتات النهار الطويل، بنجر السكر والقمح والشعير وغيرها، وعلى سبيل المثال، إذا كان طول النهار الحرج لنبات ما من نباتات النهار الطويل ١٤ ساعة، فإن هذا النبات، يزهر فقط عندما يتعرض لفترة إضاءة (طول نهار) أطول من ١٤ ساعة.

٣- نباتات نهار قصير-طويل Short-Long-day plants

تزهر هذه النباتات بعد التعرض إلى عدد معين من النهار القصير (أطول من طول نهار حرج معين)، ثم التعرض لنهار طويل (أطول من نهار حرج معين)، أي أن هذه النباتات تزهر تحت ظروف النهار الطويل بعد تعرضها لعدد كاف من النهار القصير. ومن أمثلة نباتات هذه المجموعة، النباتات العشبية التي تنمو في المناطق المعتدلة ومنها Orchard gras وبعض أنواع البرسيم.

٤- نباتات نهار قصير-طويل Long- Short-day plants

تزهر هذه النباتات بعد التعرض إلى عدد معين من النهار الطويل (أطول من طول نهار حرج معين)، ثم التعرض إلى نهار قصير (أطول من نهار حرج معين)، أي أن هذه النباتات تزهر تحت ظروف النهار القصير بعد تعرضها لعدد كاف من النهار الطويل.

٥- النباتات المحايدة Day-neutral plants

إن إزهار هذه النباتات لا يتأثر بطول الفترة الضوئية، ولكنه يتأثر بعمر النبات أساسا. عموما- يبدأ إزهار هذه النباتات بعد أن تصل إلى عمر وحجم معين. والأنواع النباتية التابعة لهذه المجموعة تتواءم للنمو عند أي خط عرض، وفي مجال واسع من درجات الحرارة. وتتبع هذه المجموعة كثير من النباتات التي نشأت في المناطق الإستوائية، ومن أمثلتها نبات القطن.

ومن الجدير بالذكر أن التقسيم السابق مبني على أساس إمكان تزهير النبات من عدمه عند تعرضها لفترات إضاءة (طول نهار) أطول أو أقصر من طول نهار حرج. والمثال على ذلك، نبات الشبيط Xanthium (من نباتات النهار القصير)، ونبات السكران Hyoscyamus (من نباتات النهار الطويل)، وأن طول النهار الحرج للشبيط ١٥.٥ ساعة، وهذا يعني أن طول النبات يزهر عندما يكون طول النهار أقل من ١٥.٥ ساعة، أما نبات السكران، فطول النهار الحرج له ١١ ساعة، من ذلك يتضح أن كلا النباتين يزهران عندما يكون طول النهار ١٣ ساعة.

دورات التأثير الضوئي Photoinduction cycles

إن معظم النباتات يجب أن تعرض إلى عدد من فترات ضوئية ذات طول معين متعاقبة،قبل إستبداء تكوين مبادئ الأزهار. وعلى سبيل المثال، نبات الشبيط، من نباتات النهار القصير، ذو طول نهار حرج قدره ١٥.٥ ساعة ضوء، ٨.٥ ساعة ظلام، فلقد وجد أنه إذا عرض النبات إلى فترة ضوئية طولها ١٥.٦٧ ساعة ضوء، ٨.٣٣ ساعة ظلام فإن النبات لا يزهر بل يستمر في النمو الخضري وتكوين أوراقا باستمرار، ولكن إذا عرض النبات إلى فترة ضوئية واحدة قدرها ١٥.٥ ساعة أو أقل، ٨.٥ ساعة ظلام، ثم أعيد تعرض النباتات إلى فترات ضوئية طولها ١٦ ساعة، وفترات ظلام قدرها ٨ ساعات، فإن مبادئ الأزهار تتكون خلال ٢-٣ يوم. هذه الفترة القصيرة الواحدة (١٥

ساعة) تعرف بـ"دورات التأثير الضوئي Photoinduction cycles أو Inductive photoperiod.

عموما- يختلف العدد الأدنى لدورات التأثير الضوئي اللازمة لحث الإزهار باختلاف الأنواع النباتية والأصناف وعمر النبات، وكذلك حجم النبات. ولقد وجد أن نباتات فول الصويا بيلوكسي، تحتاج إلى سبعة دورات تأثير ضوئي لكي تزهر (Borthwick and Paker, 1938). وأن النباتات الأقل حساسية للتأثير الضوئي، تحتاج إلى عدد أكبر من دورات التأثير الضوئي حتى تزهر.

أهمية فترة الظلام في إزهار النباتات

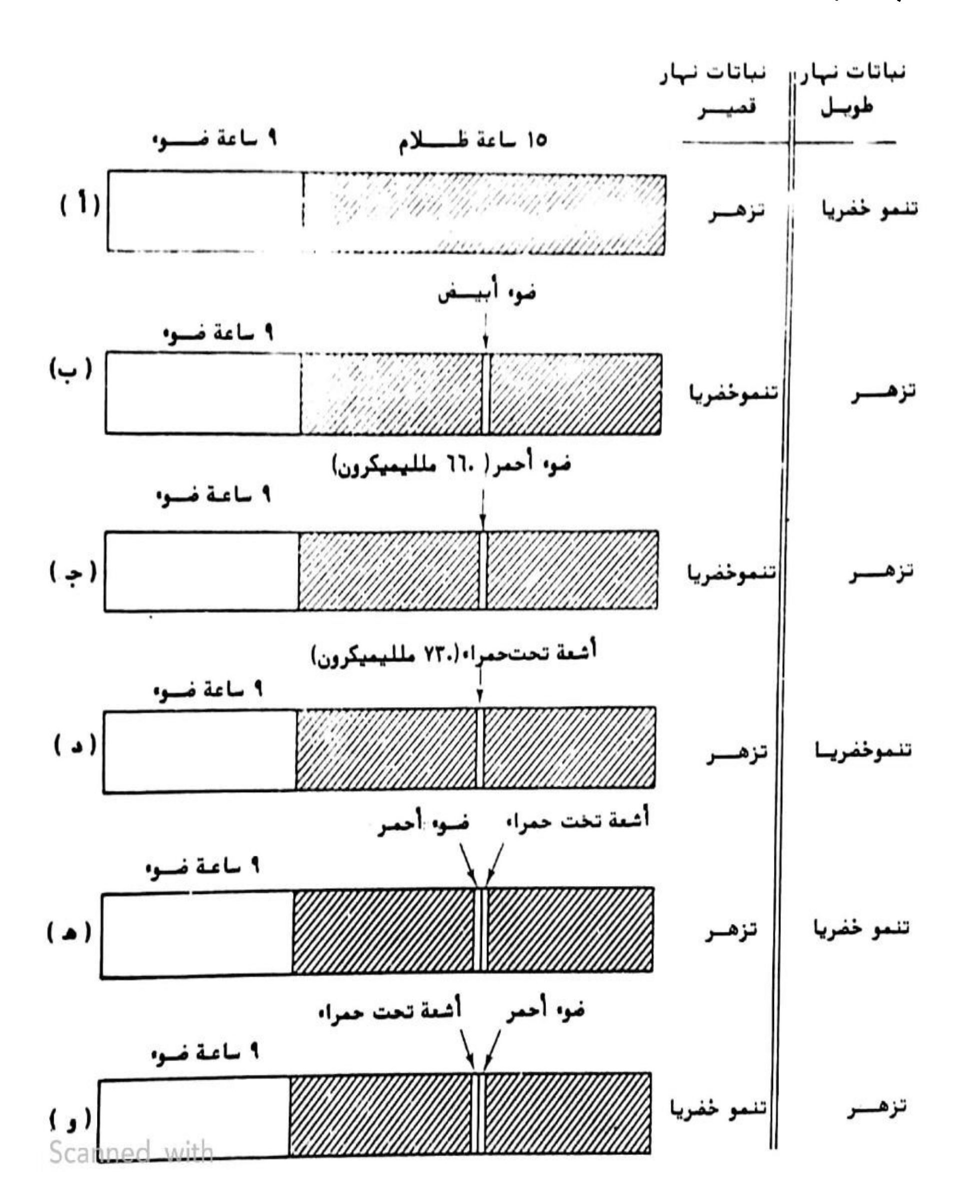
إن دورة التواقت الضوئي في الطبيعة، هي ٢٤ ساعة، وتكون فترة الإضاءة الطويلة، متبوعة عادة بفترة ظلام قصيرة، والعكس صحيح. ولقد وجد أن طول الليل أكثر تأثيرا في التواقت الضوئي Photoperiodsm من طول النهار، أي أنها أكثر أهمية في حث الإزهار بالمقارنة بفترة الإضاءة، حيث وجد أن قطع فترة الظلام المتصلة، بواسطة فترة قصيرة جدا من الضوء الأبيض (جميع الأطوال الموجية للطيف المرئي) أو من الأشعة الحمراء، أدى إلى إبطال تأثير الليل الطويل (Lang, 1952). ولقد أدى قطع فترة الظلام قرب منتصفها عن طريق ضوء ضعيف ولفترة قصيرة (دقيقة أو أقل)، كان لها تأثير نهار طويل على نباتات النهار القصير (فول الصويا صنف بيلوكسي)، وبالتالي فلم تزهر هذه النباتات واستمرت في نموها الخضري (شكل ١١-٢).

مما سبق يتضح أن الإزهار يكون أكثر استجابة لفترة الظلام المتصلة عن فترة الإضاءة، ولقد وجد أن تزهير نباتات فول الصويا صنف بيلوكسي لا يمكن حثه للإزهار ما لم تتعرض النباتات إلى فترة ظلام أكثر من ١٠ ساعات متصلة.

أما في نباتات النهار الطويل (شكل ١١-٢) فقد أدى قطع فترة الظلام المتصلة (الليل) بواسطة الضوء وذلك لفترة قصيرة، إلى حثها على الإزهار، ولقد كانت عملية قطع فترة الظلام فعالة إذا تمت بعد ٨ ساعات من بداية فترة الظلام، بينما كانت أقل فعالية إذا تمت في بداية أو نهاية فترة الظلام.

إن تأثير قطع فترة الظلام المستمرة بواسطة فترة ضوء قصيرة، يعادل تأثير نهار طويل، وهذا له أهميته التطبيقية، في توفير الطاقة في إضاءة الصوب التي تستخدم للإنتاج التجاري لبعض النباتات، وخصوصا نباتات الزينة، إذ يمكن زراعة نباتات النهار الطويل، تحت ظروف النهار القصير،

وقطع فترة الظلام بوميض من الضوء، فتعطي تأثير النهار الطويل فتزهر النباتات.



شكل (١١-٢). تأثير الضوء الأحمر، والأشعة تحت الحمراء، أثناء قطع فترة الظلام على إزهار نباتات النهار القصير والطويل. مصدر الضوء أثناء فترة الإضاءة الرئيسية هو الشمس أو لمبات التنجستن أو الفلورسنت (النيون) ذات شدة الإضاءة العالية. لاحظ التأثيرات العكسية للمعاملة بالضوء على نباتات النهار الطويل والقصير.

كما أن منتج الزهور ومربي النباتات يمكن أن يستفيد من ظاهرة قطع فترة الظلام في تنظيم وقت إزهار نباتات معينة، حيث يمكن دفع إزهار النباتات في أي وقت من السنة.

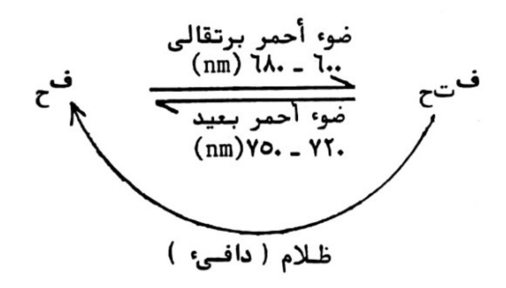
تأثير نوع الضوء على قطع فترة الظلام

إن نوع الضوء الأكثر فعالية في قطع فترة الظلام في تفاعلات التواقت الضوئي، وبالتالي الإستجابة للفترة الضوئية في نباتات النهار الطويل والقصير هو الضوء الأحمر Red light، الذي تتراوح طول موجته بين ٦٠٠-٦٨٠ ملليميكرون، والحد الأقصى لفعاليته يقع عند طول موجة قدره ٦٤٠ ملليميكرون، ولا يكون للضوء الأحمر تأثير على قطع فترة الظلام إذ تبعه التعرض إلى أشعة تحت حمراء Intrared light في المجال من ٧٢٠-٧٥٠ ملليميكرون (شكل ١١-٢).

دور الفيتوكروم في استبداء تكوين الأزهار (تهيءة النباتات للإزهار)

إن نشاط طول الأشعة الضوئية والإستجابة لها في قطع فترة الظلام يكون نتيجة لامتصاص أحد الصبغات الطبيعية، والتي تسمة بـ"الفيتوكروم Phytochrome" وهي صبغة بروتينية، تتركب كيماويا من جزء بروتيني وجزء غير بروتيني. وتوجد هذه الصبغة على صورتين هما P_r وهو الذي يمتص الضوء الأحمر، ويتحول إلى الشكل الآخر P_{fr} النشط فسيولوجيا، والذي يمتص الأشعة تحت الحمراء، ويتحول ثانية إلى P_r ويحدث أيضا تحول P_{fr} إلى P_r في الظلام، ويتوقف معدل التحول على درجة الحرارة. وأن صورة الفيتوكروم P_{fr} تثبط الإزهار في نباتات النهار القصير، بينما تشجعه في نباتات النهار الطويل. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الفيتوكروم ليس مادة منبهة للإزها، ولكنه يحث (ينبه) تمثيل وتنشيط المواد المنبهة للإزهار.

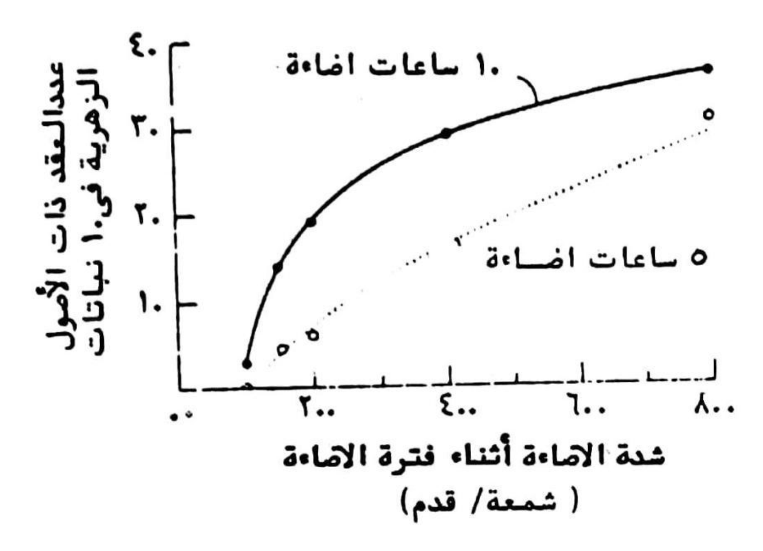
إن تأثيرات نوع الضوء على تكوين صور الفيتوكروم (P_r و P_{fr}) يمكن تلخيصها كما يلي:



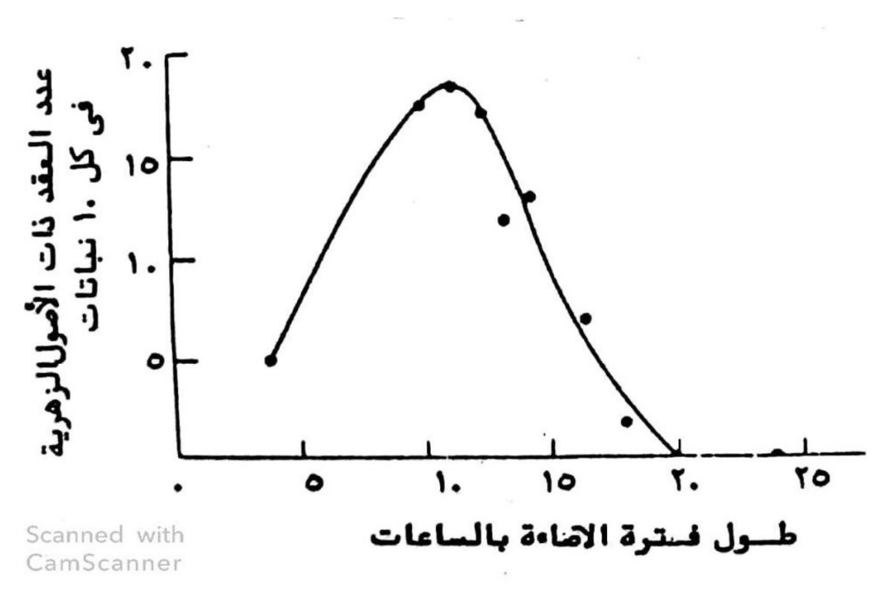
أهمية فترة الإضاءة في إزهار نباتات المحاصيل

لقد سبق أن أوضحنا أن فترة الظلام، تعتبر أكثر أهمية من فترة الضوء في حث (تشجيع) إزهار النباتات، إلا أنه بدون الضوء فإن النباتات لا تزهر، كما أن الإضاءة لها تأثيرا كميا على الإزهار. من ذلك يمكن القول بأن طول فترة الظلام تحدد استبداء مبادئ الإزهار، إلا أن طول الفترة الضوئية يؤثر في عدد مبادئ (أصول) الأزهار. ويرجع ذلك إلى أن الضوء يؤثر على كمية السكريات التي تتكون أثناء فترة التمثيل الضوئي والتي تنتقل إلى المناطق الميرستيمية، والقادرة على تكوين مبادئ الأزهار. كما وجد أيضا أن للضوء أهمية مباشرة في تخليق بعض العوامل أو الهرمون الأساسي لتكوين الأزهار.

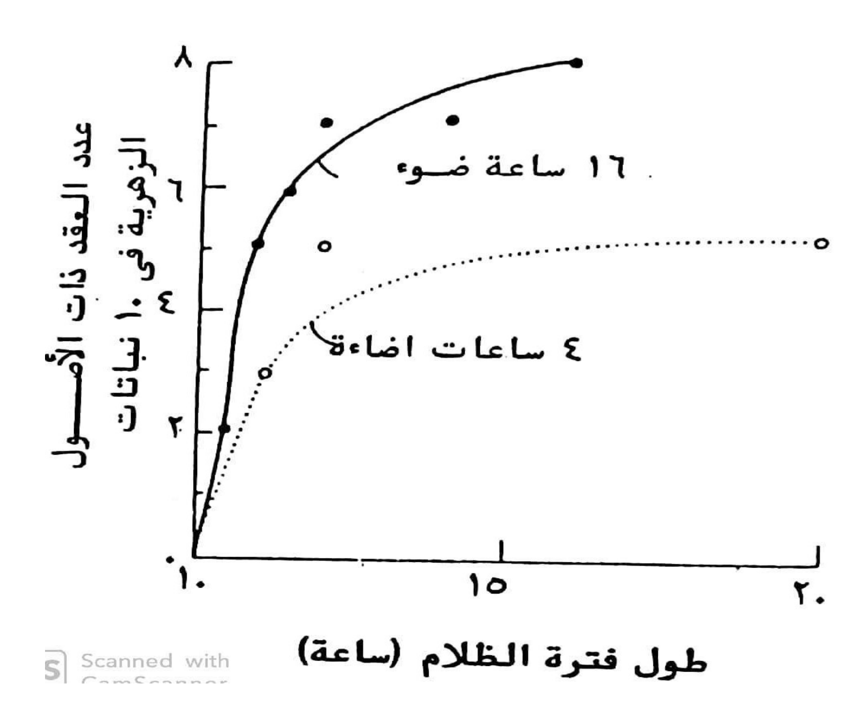
ولقد درس التأثير الكمي لطول الفترة الضوئية، وشدة الإضاءة على تكوين مبادئ الأزهار في فول الصويا صنف بيلوكسي، ووجد أنه في شدة إضاءة أقل من ١٠٠ شمعة/ قدم، لا تتكون أزهار على النباتات، وأن زيادة شدة الإضاءة تسبب زيادة في عدد الأزهار المنتجة (١١-٣)، كما أن إطالة فترة الإضاءة يؤدي إلى زيادة عدد الأزهار المتكونة على النباتات (شكل ١١-٤ ، ١١-٥).



شكل (١١-٣). العلاقة بين شدة الإضاءة، وتكوين مبادئ (أصول) الأزهار في نباتات فول الصويا بيلوكسي.



شكل (١١-٤). العلاقة بين طول فترة الإضاءة وتكوين مبادئ (أصول) الأزهار في نباتات فول الصويا بيلوكسي.



شكل (١١-٥). العلاقة بين طول فترة الظلام، وتكوين مبادئ (أصول) الأزهار في نباتات فول الصويا بيلوكسي.

٣- تكوين منبه (حافز) الإزهار Flowering stimulus

لقد سبق أن ذكرنا أن تكوين الأزهار مرتبط بالتواقت الضوئي، فبمجرد أن يتعرض النبات إلى الحد الأدنى من دورات التأثير الضوئي، وذلك في مرحلة النضج (البلوغ) للإزهار، فإن النبات سوف يزهر، نتيجة لتجميع كمية كافية من المادة المحفزة (المنبهة) للإزهار. ولقد وجد أن الأوراق هي مواضع التواقت الضوئي، ويتكون بها المادة المشجعة (المنبهة) للإزهار، والتي تنتقل إلى الميرستيمات القمية مسببة حث الإزهار وتكوين الأصول الزهرية، وبالتالي تعمل على إنتقال النبات من مرحلة النموا لخضري إلى مرحلة النمو الثمري.

ويعتبر أقوى دليل يؤيد نظرية وجود مادة منبهة (مشجعة) لإزهار أو هرمون الإزهار، هو العمل الذي قام به العالم الروسي كاجلاشجان Chailakhyan عام ١٩٣٦، الذي أطلق على هذه المادة المنبهة للإزهار بـ"الفلورجين Florigen" ولقد اقترح أنه ينتقل في اللحاء.

ولقد وجد في كثير من الأبحاث أنه إذا عرضت ورقة واحدة من النبات لدورات التأثير الضوئي، بينما لم تتعرض أوراق وأجزاء النبات الأخرى لهذه الدورات، فإن هذا يكون كافيا لإحداث الإزهار في كثير من النباتات. وعلى سبيل المثال، فقد وجد بونر Bonner وهامنر Hamner عام ١٩٣٩، أنه إذا عرضت ورقة واحدة من نبات الشبيط (من نباتات النهار القصير) إلى دورة تأثير ضوئي واحدة، بينما عرضت باقي الأجزاء إلى دورات عدم تأثير ضوئي، فإنه تتكون أزهار على النبات.

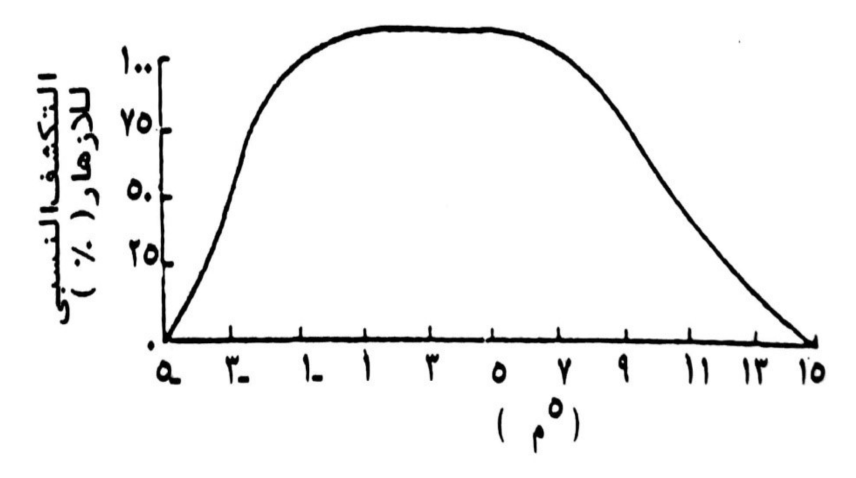
ولقد وجد أن هرمون الإزهار ينتقل بالتطعيم، إذ وجد أن النباتات الغير مستحثة، قد أزهرت عندما تم تطعيم أوراقها بأوراق نباتات مستحثة ضوئيا.

تأثير الحرارة على تهيئة النباتات للإزهار (الإرتباع)

إن درجة الحرارة تتغير بوجه عام، أو تحور من إستجابة الأنواع النباتية أو الأصناف لاستجابتها لطول الفترة الضوئية لكي تزهر. ولقد وجد أن درجة حرارة الليل الغير مناسبة، سواء كانت مرتفعة أو منخفضة قد قللت من التأثير المشجع لفترة الظلام الطويلة، على إزهار نباتات النهار القصير. ولقد وجد بوجه عام، أن درجة حرارة فترة الظلام لها تأثير هام على تفاعلات التواقت الضوئي لكل من نباتات النهار الطويل والقصير.

إن كثيرا من الأنواع النباتية، تحتاج إلى فترة قدرها ٢-٦ أسبوع من البرودة او قرب درجة حرارة التجمد (١٠ ^{o}م أو أقل)، لكي تزهر تحت الفترات

الضوئية الطويلة نسبيا في الربيع (Lang, 1951). إن هذه المعاملة بدرجة الحرارة الباردة، يطلق عليها الإرتباع Vernalization وأن عملية الإرتباع تكون فعالة بين درجة حرارة ٢-١٠°م، كما هو مبين بشكل (١١-٦). وهنا تجدر الإشارة إلى أن إستجابة النباتات للتعرض لدرجة الحرارة المنخفضة (البرودة) نوعي Qualitative إذ قد تزهر النباتات أو لا تزهر نتيجة للمعاملة.



شكل (١١-٦). نمزج عام يبين إستجابة النبات لدرجة الحرارة أثناء الإرتباع.

إن فترة التعرض لدرجة الحرارة المنخفضة أثناء عملية الإرتباع يجب أن تستمر لمد بضع أيام إلى بضع أسابيع، متوقفا ذلك على نوع النبات.

إن الحوليات الشتوية (مثل القمح والراي)، والثنائية الحول (مثل بنجر السكر)، وكثير من النباتات المعمرة، التي تزرع في المناطق المعتدلة، تحتاج إلى عملية الإرتباع لكي تزهر.

وتؤدي عملية الإرتباع إلى حث الإزهار إستجابة للنهار الطويل، أثناء الربيع، والمثال على ذلك محاصيل الحبوب الشتوية مثل القمح والراي تسلك سلوك الطرز الربيعية بالنسبة لإزهارها، وذلك بعد الإرتباع، إذ أن كلا من الطرز الشتوية والربيعية، تزهر تحت فترات ضوئية طويلة في الربيع، بعد أن يتكون عليها سبعة أوراق على الأقل.

إن الأصناف المستنبطة جديثا من المحاصيل ثنائية الحول مثل بنجر السكر، قد انتخبت على أساس إحتياجاتها الشديدة لعملية الإرتباع، لأن السيقان التي تحمل النورات (الشمراخ الزهري أو الحنبوط Bolting) في العام الأول، تكون غير مرغوبة في الإنتاج التجاري للمحصول. ولقد أمكن إنتاج طرزا

الحولية (تزهر بدون عملية إرتباع) قد انتخبت من نباتات بنجر السكر ثنائية الحول.

مكان التأثر بدرجات الحرارة المنخفضة في عملية الإرتباع

لقد دلت الأبحاث على أن المادة المنبهة (المنشطة) للإزهار الناتجة من عملية الإرتباع تتكون في الميرستيمات أو البراعم، وليس في الأوراق وذلك بدليل أن:

١- البذور المنقوعة في الماء يمكن إرتباعها،

٢- أن تعرض كلا من الأوراق أو السيقان أو الجذور فقط لدرجات الحرارة المنخفضةن لم يكن فعالا في عملية الإرتباع،

٣- يمكن إرتباع البذور أثناء تكوينها على النبات الأم، إذا تعرضت إلى درجات الحرارة المنخفضة قبل أن تجف على النبات الأم،

٤- النباتات الناتجة من البراعم الجانبيةلورقة مرتبعة، قد تحث على الإزهار.

تأثير منظمات النمو على الإزهار

تؤثر منظمات النمو على إزهار النباتات، ويتوقف ذلك على نوع منظم النمو، تركيبه، وميعاد إضافته بالنسبة لطور نمو النبات، ونوع النبات.

ولقد وجد أن إندول حمض الخليك Indol aceti acid يثبط الإزهار في نباتات النهار القصير، وأن التركيزات العالية منه تثبط إزهار نباتات النهار الطويل.

وعلى العكس من ذلك، فقد وجد أن الأكسينات تشجع الإزهار في بعض الأنواع النباتية الأخرى، إذ يستعمل ٢،٤-د (2,4-d) رشا على بعض أشجار الفاكهة لحث إزهارها وذلك على نطاق واسع.

ولقد وجد أن الأكسين المتكون في الأوراق الحديثة (الغير ناضجة) لنباتات فول الصويا، تعمل على تثبيط إزهار النباتات، حتى يتكون على النبات عددا كافيا من الأوراق الناضجة، أي تتكون نسبة متوازنة من الأوراق الناضجة والأوراق الغير ناضجة (Fisher and Loomis,1954). ولقد وجد أيضا أن البراعم والأوراق الحديثة العمر تكون غنية بالأكسين.

وعلى عكس الأكسينات، فإن الجبريلينات تعمل على تشجيع الإزهار بوجه عام. ولقد وجد أنه يمكن إحلالل المعاملة بالجبريلين محل تعرض بعض

النباتات محل كل أو جزءا من عدد دورات التأثير الضوئي ودرجات الحرارة المنخفضة اللازمة لحثها على الإزهار.

كما يمكن للجبريلين حث الأزهار في أنواع نباتية إستوائية والتي تعتبر غير حساسة لطول الفترة الضوئية.

ثانيا- استبداء تكوين الأزهار Floral initiation

بعد تكوين المادة المنبهة للإزهار (هرمون الإزهار)، فإنها تنتقل إلى البراعم (مناطق النمو الميرستيمية بالقمم النامية)، وعندئذ يتحول استبداء وتكوين الأوراق (النمو الخضري) فجأة إلى استبداء تكوين أصول الأزهار، متبوعا بتكوين الأجزاء الأخرى للزهرة. غن هذا التحول الموفولوجي للميرستيم من الحالة الخضرية إلى الحالة الزهرية، والذي يطلق عليه Floral initiation، يمثل تغيرا كبيرا في العمليات الفسيولوجية الدائرة بالنبات. والذي ينعكس على انتقال المواد الممثلة، وكذلك المواد الغير عضوية، وإعادة توزيعها بين أعضاء النبات المختلفة، وكذلك معدل نمو الأعضاء المختلفة، وغيرها.

ثالثا- نمو وتكشف الأصول الزهرية

يلي مرحلة استبداء تكوين أصول الأزهار، مرحلة نمو وتكشف هذه الأصول الزهرية إلى أزهار ناضجة ونورات تحت الظروف الضوئية والحرارية المناسبة والمهيئة للإزهار. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه ليس من الضروري أن تتم هذه المرحلة تحت نفس الظروف الضوئية والحرارية التي تحدث فيها مرحلتي حث، واستبداء تكوين الأصول الزهرية (Hamner, 1969)، إذ وجد أن هذه المرحلة تعتبر أقل حساسية لطول الفترة الضوئية.

المراجع

Abu-Shakra, S.; M. Akhtar and D.W. Bray (1969). Agron. J. 61: 596 – 71.

Ashley, D. A.; B. Doss and O. Bennett (1963). Agron. J. 55: 584 – 85.

Balls, W. L. and F. S. Holton (1915). Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. 203: 103.

Bhan, V. M. and H. K. Pende (1966). Agron. J. 58: 454.

Borthwick, H. H. and M. W. Parker (1938). Bot. Gaz. 99: 825 – 39.

Boyer, J. S. (1970). Plant Physiol. 46: 233 235.

Brix, H. (1962). Physiol. Plant. 15: 10 20.

Burriss, J. S.; O.T. Edge and A.H. Wahab (1973). Crop Sci. 13: 207 – 10.

Burton, J. ; W. De Vane and R. L. Carter (1954). Agron. J. 46: 229 – 233.

Chailakhyan, M. K. (1963). Proc. Acad. Sci. USSR.

Clark, B. E. and N. H. Peck (1968). N. Y. Agric. Exp. Stn. Bull. 819.

Duncan, W. G. (1958). Agron. J. 50: 82 – 84.

Duncan, W. G. (1971). Crop Sci. 11: 482 - 85.

Duncan, W. G. (1975). In Crop Physiology, ed. L. T. Evans. London Camb. Univ. Press.

Elawad,S. H.; G. Garsho and J. J. Street (1982).Agron. J. 74: 842 – 84.

Epstein, E. (1972). Mineral nutrition of plants. Principles and perspectives. New York:Willey.

Evans, L. T.; I. F. Wardlaw and R. A. Fisher (1975). In Crop Physiology, ed. L. T. Evans. London Cambridge Univ. Press.

Francis, C. A.; J. N. Rutger and A. F. Palmer (1969). Crop Sci. 9: 537 – 79.

Frey, K. J. and S. C. Wiggans (1957). Agron. J. 49: 48 – 50.

Hamner, K. C. (1969). In The Interoduction of flowering, ed. L. T. Evans. London Cambridge Univ. Press.

Heap, A. J. and E. I. Newman (1980). New Phytol. 85, 173 – 179.

Hofstra, G. and C. P. Nelson (1969). Planta 88: 103 – 12.

Hsaio, T. C.; E. A. Cevedo; E. Ferres and D. W. Handerson (1976). Philos. Trans. R. Soc. Lond. (B) 273 – 479.

Holdworth, M. (1956) J. Exp. Bot. 7: 395 – 404.

Gardner, F. P.; R. B. Pearce and R. L. Mitchell (1958). Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press: Ames.

Ishizuka, Y. AND a. Tanaka (1963). Studies on the nutria-Physiology of the rice plants. Yokendo, Tokyo.

Junper, B. E. (1976). Annu. Rev. Plant Physiol. 27: 385 – 406.

Keck, R. W. and J. S. Boyer (1974). Plant Physiol. 53: 474 – 479.

Kittack, D. L. and J. K. Patterson (1959). Agron. J. 51: 512.

Karamer, P. J. (1983). Water Relations of plants. New Yowrk: Academic Press.

Kutschera, L. (1960). Wurzelatlas Mitteleuropaischer und Acker-unkrater und kulturpflanzen. Frankfurt: DLG Verlag.

Lang, A. (1952). Annu. Rev. Plant Physiol. 3: 265 – 309.

Langer, R. H. (1972). How grasses Grow?. London Edward Arnold.

Leopold, A. C. and p. e. Kriedman (1981). Plant growth and development. Tata McGraw-Hill New Delhi.

Milthorpe, F. L. and J. Moorby (1979). An Interoduction to crop Physiology. Cammbridge University Press, London.

Moss, D. N. (1963). Conn. Agric. Exp. Stan. New Haven, Bull. 664: 68 – 101.

Murata, Y. and J. I. Iyama (1963). Proc. Sci. Soc. Japan. 31: 315 – 322.

Okuda, O. and E. Takahashi (1964). In “Mineral Nutrition of Rice Plant”. Baltimora, IRRI and the Jones Hopkines Univ. Press.

Sharpe, R. E. and W. J. Davies (1979). Planta 147: 43 – 49.

Sivakumar, M. V.; H. M. Taylor and R. H. Shaw (1977). Agron. J. 69: 470 – 73.

Smith, J. J. and E. M. Canper (1975). Agron. J. 67: 681 – 84.

Stickler, F. C.; S. Wearden and A. W. Pauli (1961). Agron. J. 53: 187 – 18.

Viets, F. G. (1972). Water deficits and nutrient availability. In “Water deficits and plant growth”. T. T. Kozloweski, ed. 3: 217 – 239. Academic Press, New York.

Wiersma, J. V. and T. B. Baily (1975). Agron .J. 67: 26 – 30.

Williams, M. C. (1960). Plant Physiol. 35: 500 – 505.

PDF www.ijpac.com> IJP (2017). Physiological Parametare, Lef area index, Crop growth rate, Relative growth rate.

https: www. Slideslare. Net> mobile (2017). Physiology of flowering, photopehaidism. Slide share.

https: www.nationalgeagraphic. Org. (2019). Photosynethesis. National Geagraphic Society.

https: www. Researchgate.net.2252 (2012). (PDF) Plant rate growth, architecture and function – Research Gate.

https. //en.m. Wikipedia.org>wick/ (2017). Extintion Coefficient.

صدر أيضا للمؤلف

- **فسيولوجيا المحاصيل** (الطبعة الأولى ١٤١٣هـ - ١٩٩٤م)
- **الذرة الشامية والذرة الرفيعة** (الطبعة الأولى ١٤١٦هـ - ١٩٩٥م)
- **القمح** (الطبعة الأولى ١٤٢٢هـ - ٢٠٠١م)
- **انتاج محاصيل الحبوب** (الطبعة الأولى ١٤٤٠هـ - ٢٠١٩م)